

# CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS HABITANTES DEL VALLE DE ABURRÁ

**2008-2015**

CONTRATO NO. CCT 1088 DE 2016





# CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS HABITANTES DEL VALLE DE ABURRÁ

**2008-2015**

CONTRATO NO. CCT 1088 DE 2016



EJECUTA



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

Facultad Nacional de Salud Pública  
Héctor Abad Gómez

UN PROYECTO DE



**Nota Derechos Reservados**

Está prohibida la reproducción parcial o total de esta publicación y mucho menos para fines comerciales. Para utilizar información contenida en ella se deberá citar fuente.



## **Contaminación atmosférica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del Valle de Aburrá, 2008-2015**

**UN PROYECTO DE**

### **ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ**

Eugenio Prieto Soto  
**Director**

María del Pilar Restrepo Mesa  
**Subdirectora Ambiental**

Diana Fernanda Castro  
**Líder del Programa de Gestión Ambiental**

**EJECUTA**

**Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia**  
**SUPERVISIÓN**

### **Área Metropolitana del Valle de Aburrá**

Ana Zuleima Orrego Guarín  
Ángela Lucía Molina Chica

### **EQUIPO DE INVESTIGACIÓN**

Juan Gabriel Piñeros Jiménez  
Hugo de Jesús Grisales Romero  
Emmanuel Salvador Nieto López  
Nora Adriana Montealegre Hernández  
Fernán Alonso Villa Garzón  
Ruth Marina Agudelo Cadavid  
Heisling Alexander Cubaque López

### **Coodinación de la publicación**

Oficina Asesora de Comunicaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá

### **Impresión**

Digital Express

### **Diagramación y Diseño gráfico**

Ricardo Leal Castañeda /Rleal design

### **Registro ISBN**

978-958-8513-92-8

**11-Diciembre-2018**

**primera edición**





## PRÓLOGO

Nuestro territorio, como muchas ciudades y áreas metropolitanas del mundo, enfrenta uno de los mayores desafíos contemporáneos: garantizar un aire saludable, pese a los modelos de ocupación, a las condiciones geomorfológicas del territorio, el acelerado urbanismo, los patrones de producción y de consumo, la forma y los medios en que nos movemos y el cambio climático global.

El principal logro en la búsqueda de enfrentar este reto, lo constituye la gobernanza del aire, lograr entregar al territorio la sistematización de la problemática y estrategias de acción sostenibles en el tiempo, a partir de una posición articuladora del territorio, de sinergias y corresponsabilidad.

Reconociendo este panorama, la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera que “la contaminación ambiental es el mayor desafío para la salud pública mundial” (OMS 2018). Estima que el 87% de la población del mundo vive en lugares donde los niveles de calidad del aire son perjudiciales, cerca de siete millones de personas mueren cada año por la exposición al material particulado fino, considera que el 36% de todas las muertes por cáncer de pulmón, el 34% de los accidentes cerebrovasculares y el 27% de las muertes por cardiopatía están asociadas a la calidad del aire. La magnitud del problema es evidente, teniendo en cuenta que el 90% de los municipios y ciudades de países de ingresos bajos de Europa, América Latina, Asia y Oriente Medio exceden los límites de contaminantes establecidos por la OMS. En Colombia, en 2015 el Departamento Nacional de Planeación estimó que aproximadamente ocho mil muertes estarían asociadas con la baja calidad del aire, los cuales generan costos económicos y sociales estimados en 12.3 billones de pesos, equivalentes al 1.5% del PIB. Igualmente, el Instituto Nacional de Salud, en reciente publicación sobre la carga de la enfermedad ambiental en Colombia, registra que en el año 2016 un total de 15.681 muertes ocurridas en el país son atribuibles a la calidad del aire (INS, 2018)

La evidencia científica ha determinado que los efectos en la salud de la contaminación atmosférica, están relacionados con el tipo de contaminantes y la exposición de la población, siendo identificados principalmente las partículas en suspensión ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) y Ozono ( $O_3$ ), por ello a través de nuestra red de monitoreo de calidad del aire, realizamos seguimiento permanente, en especial a  $PM_{2.5}$ , considerado el contaminante crítico, lo cual nos ha permitido avanzar a estados de prevención y no solo de control ante situaciones de alerta ambiental. Avanzamos al pasar de “Atender episodios a prevenir episodios críticos de contaminación atmosférica”

Basados en lo anterior y teniendo en cuenta que el Ministerio de Salud y Protección Social, mediante el Plan Decenal de Salud Pública 2012-2021 ha considerado la salud ambiental como



una de las dimensiones prioritarias para el logro de la salud y lo considera un derecho humano de los colombianos, impulsamos la creación del Sistema Metropolitano de Vigilancia de Salud Ambiental, componente aire y salud, con el objeto de preservar la salud de los habitantes de nuestro territorio, así como de establecer la evidencia epidemiológica territorial, dadas las particularidades poblacionales, geográficas y ambientales del Valle de Aburrá. El Sistema de Vigilancia Epidemiológica implica establecer acuerdos y lograr la concertación intersectorial para la recolección, análisis e interpretación permanente y oportuna de información, generada en el monitoreo ambiental y en el sector salud, incluye lo relacionado con morbilidad y mortalidad asociada a la calidad del aire, además de sus factores determinantes de tipo socioeconómico.

El sistema de vigilancia se constituye en la herramienta fundamental para el seguimiento y monitoreo, no solo del impacto de las acciones realizadas frente a la calidad del aire, sino también para avanzar en modelos explicativos propios y plantear acciones de promoción, prevención e intervención más adecuadas para la protección de la salud, por tanto ha sido fundamental que en el marco del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire 2017-2030 (PIGECA) se incluyó el Eje Temático I, orientado al “Fortalecimiento, generación y aprovechamiento del conocimiento científico y la tecnología”, el cual establece como medida prioritaria la implementación del Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Salud Ambiental.

En este marco de acciones estratégicas y considerando que la región no contaba con estudios actualizados y recientes que den cuenta de la relación que existe entre la calidad del aire y la salud, nos complace presentar esta publicación, que incluye los resultados de la investigación realizada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá con la Facultad Nacional de Salud Pública de la Universidad de Antioquia, denominada: Eventos en salud asociados a la exposición de corto plazo a contaminantes del aire, en los municipios del Área Metropolitana, 2008-2015. Los resultados de esta investigación y logros alcanzados respecto al Sistema de Vigilancia Epidemiológica de Salud Ambiental nos permiten dotar al territorio de instrumentos analíticos de gran calidad, nos brinda la oportunidad de participar en el contexto nacional y mundial en espacios de discusión y de definición de estrategias, tal como fue nuestra participación en la I Conferencia Mundial de la OMS sobre la contaminación del aire y la salud y en muchos otros espacios de debate técnico y científico.

Con el fin de continuar dotando a la Región Metropolitana de herramientas y conocimiento científico, que nos permita conocer mejor la problemática para tomar las mejores decisiones para su solución, avanzamos actualmente en el análisis de los efectos en salud de tipo crónico y de exposición a largo plazo, así como en determinar su comportamiento cuando hay exposición a múltiples contaminantes.

Es indudable los avances alcanzados, contamos con un territorio de gran capacidad institucional, organizativa y en innovación por consiguiente debemos seguir avanzando como “Territorios Integrados” para responder a tan grandes desafíos como región y sociedad, aprovechando nuestras fortalezas, la experiencia lograda y con claridad en los resultados, que nos permita contar con un territorio que sea líder en la gobernanza del aire y cumplir con nuestro objetivo primordial de gozar de un aire sano y preservar la salud de los habitantes actuales y futuros.

*Eugenio Prieto Soto*

*Director*







## INTRODUCCIÓN

Una de las prioridades en las agendas ambientales y sanitarias a nivel mundial, regional y nacional, es la valoración de los impactos en salud asociados a factores de riesgo ambiental. Esta relación es el punto de partida para comprender la interrelación entre las comunidades y la naturaleza, y requisito para diseñar planes y políticas que coloquen a la salud y a la vida como eje central de toda acción de la sociedad para asegurar la sustentabilidad de los territorios (OMS, 2017).

Según el Índice de Desempeño Ambiental de 2018, la mala calidad del aire es la mayor amenaza ambiental para la salud pública, y el mayor reto político para los países de medianos y bajos ingresos (Friedrich, 2018). Existe una amplia evidencia sobre los efectos negativos de la contaminación atmosférica para la salud de la población, asociada a exposiciones de corta duración (horas o días) y exposiciones de larga duración (años). Académicos independientes y organismos internacionales comprometidos con el análisis y monitoreo de dicha problemática, han proporcionado al respecto una creciente literatura validada por expertos en epidemiología ambiental (Katsouyanni et al., 1997; OMS, 2013; Pope III, 2004; Romieu et al., 2012; Schwartz, 2000; Wong, Vichit-Vadakan, Kan, & Qian, 2008).

Los estudios pioneros en esta materia se centraron en los episodios graves de calidad del aire ocurridos en Meuse Valley (Bélgica, 1930), Donora (Pennsylvania, 1948) y Londres (Inglaterra, 1952). Las evidencias proporcionadas impulsaron de manera excepcional las investigaciones subsiguientes en esta área; sobre todo, en las dos últimas décadas se han confirmado los efectos adversos, no sólo de los niveles excepcionalmente altos sino incluso de niveles bajos de varios contaminantes atmosféricos (Anderson, 1999; Pope III, 2004).

En la revista *The Lancet* del área de la salud, Cohen y colaboradores (2017) publicaron un análisis sobre el impacto en la carga de la enfermedad atribuible a la contaminación del aire a nivel mundial y nacional, en el cual identificaron que entre 1990 y 2015 el material particulado fino-PM<sub>2.5</sub>- ocupaba el quinto puesto entre los factores de riesgo con mayor impacto en la mortalidad global. Estimaron que la contaminación del aire causó cerca de 4,2 millones de muertes anuales, que representaron el 7,6% del total de muertes mundiales, principalmente por eventos cardio y cerebro-vasculares, enfermedades respiratorias y algunos tipos de cáncer. Los reportes por países han permitido identificar a Colombia entre el grupo de naciones donde las muertes atribuidas a PM<sub>2.5</sub> representaron cerca del 5% de las muertes por todas las causas. Por su parte, Malley y colaboradores (2017) consideraron entre 1.03 y 1.42 millones de muertes anuales por causas respiratorias en población mayor de 30 años atribuibles a la exposición de ozono-O<sub>3</sub>, en µg/m<sup>3</sup>.



Con base en los hallazgos de algunos de estos estudios, en Estados Unidos y Europa se adoptaron legislaciones que establecieron límites estrictos a los niveles de las emisiones de los contaminantes criterio como  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ ; así mismo la OMS estableció niveles guías para dichos contaminantes que se basan en el riesgo de daño a la salud de las poblaciones (OMS, 2006). Pese a la generalizada adopción de legislaciones de este tipo en buena parte del mundo, los mayores logros en materia de contención de las emisiones se han observado casi exclusivamente en los países de ingresos altos, manteniéndose vigente dicha problemática en países de ingresos medios y bajos. Entre las regiones del mundo, Latinoamérica está en un nivel intermedio en cuanto a la calidad del aire; sin embargo, acarrea un mayor riesgo potencial en términos ambientales y de salud pública, debido a su proyección como foco mundial de crecimiento urbano, dado que se estima que alrededor del 85% de su población residirá en la zona urbana de las ciudades para el año 2050.

El Estudio de Salud y Contaminación del Aire de Latinoamérica- ESCALA (Romieu et al., 2012), llevado a cabo en 9 ciudades de la región entre 1997 y 2005, estimó que el aumento de  $10\mu g/m^3$  de  $PM_{10}$  se relacionaba con incrementos en los riesgos de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares de 0,39% y 1.04%, respectivamente. Así mismo calculó que debido a la contaminación del aire, cada año se morían 35.000 personas y se perdían 276.000 años de vida; la causa principal de este fenómeno ha sido el uso intensivo de combustibles fósiles en los sectores industriales y de transporte.

Para el año 2010, el Banco Mundial evaluó los costos asociados a la salud ambiental en Colombia y estimó que 5.000 muertes prematuras y 69 millones de Años de Vida Ajustados por Discapacidad anuales eran explicados por la contaminación del aire en extramuros, con un costo cercano a 5,7 trillones de pesos (Golub, Klytchnikova, Sanchez-Martinez, Belausteguigoitia, & Molina, 2014). Este informe reveló que la exposición a la contaminación del aire y sus consecuencias son desiguales entre los distintos grupos sociales, afectando en mayor medida a los más pobres y vulnerables. Recomendó la realización de estudios con diseños complejos para establecer la relación epidemiológica entre calidad del aire y la salud. Sugirió además encaminarse hacia el desarrollo de sistemas de vigilancia en salud ambiental a partir de los sistemas de información disponibles en los territorios, que pemrita: 1) apoyar la planificación y acción en salud, 2) guiar la intervención eficaz de los factores de riesgo ambientales (contaminación del aire), 3) evaluar los programas y servicios de salud pública, 4) establecer las prioridades en investigación, y 5) orientar las políticas en salud ambiental.

En los últimos años, agencias de gobierno de Colombia han asumido la contaminación del aire como una de sus mayores preocupaciones. El Ministerio de Salud y Protección Social ha considerado la salud ambiental como una de las dimensiones prioritarias para el logro de la salud como derecho humano de los colombianos. En el documento CONPES 3550 de 2008, se establecieron los lineamientos para la formulación de la Política Integral de Salud Ambiental, otorgándose máxima prioridad a la intervención sobre la calidad del aire, reconociendo su efecto poblacional, particularmente en los grupos con mayor vulnerabilidad como son menores de 5 años, las gestantes, los adultos mayores y la población trabajadora en condición de informalidad. Así mismo se ha incluido esta dimensión en el Plan Decenal de Salud Pública 2012 – 2021. donde se señalan un conjunto de acciones para materializar el derecho a un ambiente sano (Ministerio de Salud y Protección Social, 2012).

A nivel regional, Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha liderado en el marco de sus funciones misionales de planeación del territorio, autoridad ambiental y de movilidad en los diez municipios asociados, estrategias e instrumentos de gestión, orientados al mejoramiento de la calidad del aire, especialmente impulsado por el concomitamiento de los efectos en salud de la calidad del aire. En su Plan de Gestión 2016-2019: Territorios Integrados, plantea como base fundamental el desarrollo humano integral, y como objetivo superior el desarrollo territorial con equidad.



Establece como líneas estratégicas: 1) Planeación y gestión territorial para la equidad; 2) Calidad ambiental y desarrollo sostenible; 3) Movilidad sostenible, segura y amable; y 4) Seguridad, convivencia y paz. Y como líneas de soporte y apoyo institucional para la gestión: 1) Soporte institucional, gestión y cooperación; y 2) Comunicación pública y movilización social.

En su línea estratégica 2: Calidad Ambiental y desarrollo sostenible, contempla como objetivo principal propender por la sostenibilidad ambiental mediante el fortalecimiento de la autoridad ambiental urbana, la planeación del suelo rural, el fortalecimiento y valoración de la estructura ecológica metropolitana, la generación, mejoramiento y apropiación del espacio público verde; para lo cual plantea realizar la gestión integral del riesgo, y establecer estrategias para la disminución a corto, mediano y largo plazo de la contaminación del aire, haciendo de obligatorio cumplimiento para todos los involucrados, las disposiciones que se deriven de su implementación. Igualmente, establece los lineamientos y las directrices generales del diseño e implementación del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire PIGECA.

El Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire 2017-2030 (PIGECA) tiene como objetivo mejorar progresivamente la calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá para salvaguardar la salud pública y proteger el ambiente, así como para elevar el bienestar social y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible. El PIGECA establece metas específicas de concentración para  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  y Ozono. Para el logro de los objetivos y las metas planteadas, el PIGECA ha sido estructurado alrededor de 4 pilares (o ejes transversales) y 10 ejes temáticos. A su vez, cada pilar y eje estratégico está integrado por una serie de líneas de acción.

El Eje Temático 1: Fortalecimiento, generación y aprovechamiento del conocimiento científico y la tecnología, reconoce explícitamente que la ciencia y la tecnología son esenciales para el logro de los objetivos y metas del PIGECA, ya que permiten la comprensión de la realidad y crear soluciones a los problemas que enfrenta la sociedad e innovar medios y modos para satisfacer las necesidades. Define nueve estrategias para desarrollar este objetivo: 1) Diseño e implementación de un Sistema de Vigilancia Epidemiológica, 2) Fortalecimiento de las bases científicas acerca de los efectos de la calidad del aire sobre la salud, 3) Diseño de un Marco de Indicadores de Salud de los Efectos de la calidad del aire en el Valle de Aburrá, 4) Desarrollo y ejecución de una agenda de investigación científica, 5) Mejora continua de la red de monitoreo, pronóstico y alertas de la calidad del aire, 6) Mejora continua del Inventario de emisiones, 7) Desarrollo de inteligencia de datos, 8) Información abierta y accesible y 9) Continuar con el proyecto de Ciudadanos Científicos.

La estrategia 1 Diseño e implementación de un Sistema de Vigilancia Epidemiológica, plantea como fin el incluir unidades centinela, para mejorar la comprensión, seguimiento y evaluación de los síntomas y enfermedades asociadas con la contaminación del aire. Dado que la salud es el centro de la problemática, se requiere una recolección sistemática y permanente de datos esenciales de salud; su análisis y su interpretación es fundamental para la planeación, implementación y evaluación de estrategias de prevención.

La estrategia 2 Fortalecimiento de las bases científicas acerca de los efectos de la calidad del aire sobre la salud, define la necesidad de implementar herramientas y acceso a sistemas de información para la valoración de dichos efectos en el caso específico del Área Metropolitana. Como parte de esta tarea, plantea la realización de investigaciones que permitan sumar al amplio acervo de conocimiento internacional acerca de este tema y permita identificar las características y factores determinantes propios del territorio metropolitano.

Las estrategias establecidas en las líneas del PIGECA respecto al diseño de un marco de Indicadores de salud de los efectos de la contaminación atmosférica, desarrollo y ejecución de una agenda de investigación científica y en el desarrollo de inteligencia de datos y contar con información abierta y accesible, tienen como objetivo facilitar el seguimiento y evaluación de los efectos en la salud,



los costos asociados y el monitoreo de los resultados de las diferentes intervenciones realizadas que permitan alcanzar una mejor e integral comprensión de los problemas y desarrollar visiones que contribuyen a tomar decisiones más acertadas.

En el Área Metropolitana y la ciudad de Medellín se han registrado en los años 2015 y 2016 episodios críticos de contaminación atmosférica, agravados por las condiciones ambientales particulares debidas a su topografía y clima. Este escenario requirió que AMVA adoptara mediante el Acuerdo Metropolitano N°15 de 2016, el Protocolo para enfrentar episodios críticos de contaminación atmosférica, el cual establece las acciones y procesos de los actores para intervenir en los momentos de contingencia ambiental.

Particularmente, en los municipios del AMVA (Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas), se ha reconocido un deterioro en la calidad del aire durante las últimas dos décadas, sustentado no sólo en el incremento de las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  desde el 2002 (Golub et al., 2014) sino también en la mayor amplitud y duración de los eventos críticos de contaminación observados semestralmente (febrero-marzo y octubre-noviembre), lo cual ha supuesto riesgos mayores para la salud de aproximadamente los 4 millones de habitantes que residen en la región.

Una primera aproximación al estudio de la relación entre la calidad del aire y la salud en la región, fue realizada por la Facultad Nacional de Salud Pública en el año 2007, por solicitud de AMVA como autoridad ambiental con jurisdicción en todo el Valle de Aburrá (Martínez. L, Quiroz, & Rúa, 2011). Esta investigación inicial determinó la necesidad de realizar estudios más detallados sobre esta relación y avanzar en la vigilancia epidemiológica de la calidad del aire y la salud. Diez años después, en virtud del conocimiento acumulado a nivel mundial, la necesidad de establecer la evidencia epidemiológica local, dadas las particularidades poblacionales, geográficas y ambientales presentes en el Valle de Aburrá, el AMVA convocó nuevamente a la Facultad para evaluar los efectos sobre la salud por la exposición a  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  en los municipios del AMVA, y aportar al cumplimiento del PIGECA en su eje temático n° 1: "Generación, aprovechamiento y fortalecimiento del conocimiento científico y la tecnología", al contribuir con insumos que pueden soportar la toma de decisiones para el cuidado de la salud y el bienestar de la población desde los distintos sectores involucrados.

El cumplimiento de esta responsabilidad se hizo mediante la celebración del contrato N° CCT 1088 de 2016, cuyo objeto fue: Determinar el comportamiento de la contaminación atmosférica según indicadores trazadores y su relación con la morbilidad y mortalidad de los habitantes del Valle de Aburrá y su desagregación por cada uno de los 10 municipios que lo conforman, lo que permitió el desarrollo de una investigación epidemiológica de tipo ecológica de series de tiempo, que exploró a nivel poblacional la asociación de los cambios en las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  con eventos de morbilidad y mortalidad por eventos centinela de tipo respiratorio y circulatorio en unidades de tiempo diaria y para cada uno de los municipios del AMVA, entre los años 2008 y 2016; este estudio valoró los efectos sobre la salud asociados a la exposición de corta duración a los cambios en la calidad del aire.

Para su ejecución, el proyecto se organizó en tres componentes técnicos: 1) Componente Ambiental, el cual se enfocó en caracterizar el comportamiento de la calidad del aire en cada uno de los municipios del Valle de Aburrá a partir de indicadores trazadores y meteorológicos; 2) Componente Epidemiológico, en el que se estableció la asociación entre eventos centinela de salud (morbilidad y mortalidad) y las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ ; y 3) Componente de revisión documental y de redes de conocimiento, que se encargó de la recopilación de investigaciones relacionadas con los efectos sobre la salud por la contaminación atmosférica y la identificación de redes y grupos de investigación con experiencia en estudios epidemiológicos de ésta relación en el ámbito internacional, nacional y territorial.



La base fundamental de este estudio fue la gestión, los análisis de la calidad de la información y la integración de ésta en las bases de datos disponibles entre 2008-2016, de diversas fuentes, como: 1) registros del sistema de monitoreo de calidad del aire de AMVA, 2) datos meteorológicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM, 3) datos de estadísticas vitales del Departamento Administrativo Nacional de Estadística- DANE, 4) registros individuales de prestación de servicios –RIPS y 5) registro del Sistema de Vigilancia en Salud Pública –SIVIGILA.

Así mismo, se emplearon procesos que permitieron desarrollar metodológicamente el análisis epidemiológico ambiental a nivel local, al introducir técnicas de inteligencia computacional (minería de datos) como redes neuronales, árboles y reglas decisión, y procesos estadísticos como los modelos aditivos generalizados tipo Poisson, con rezagos puntuales y distribuidos. Cada una de estas técnicas se consultaron y validaron con expertos internacionales y nacionales que acompañaron el proyecto.

El desarrollo de la metodología logró: 1) los procesos de imputación de los datos no disponibles en las distintas estaciones de monitoreo; 2) la integración de series ambientales para la generación de una única serie de cada contaminante específico para cada unidad territorial; 3) la identificación de los eventos centinela a partir de la información disponible en los sistemas de información en salud; 4) la construcción de bases de datos para el análisis de información; 5) la construcción de modelos explicativos por contaminante, evento en salud y grupo de edad para cada uno de los municipios; 6) el análisis de eventos de contaminación del aire de alto interés como los atmosféricos críticos; 7) el proceso de construcción de algoritmos de búsqueda de literatura especializada en la relación epidemiológica entre calidad del aire y eventos en salud; y 8) la búsqueda de actores y redes de conocimiento sobre el tema a nivel local, nacional y regional.

El documento está dividido en tres capítulos en los que se resumen los resultados más importantes del estudio; en el primero se exponen los resultados de una búsqueda de la literatura especializada a nivel mundial que fue escrita entre los años 2008-2016, sobre la relación entre la contaminación del aire y los eventos en salud, así mismo se exponen los resultados de un mapeo de investigadores, grupos de investigación y redes de conocimiento en el tema a nivel local, nacional y regional en las Américas.

El segundo capítulo describe el comportamiento de los contaminantes criterio  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ , durante los periodos y los años de estudio para cada uno de los municipios del AMVA a partir de un serie representativa para cada territorio donde se hizo énfasis en el comportamiento estacional y la tendencia de cada serie y se analizaron las excedencias en función de la normatividad nacional e internacional; además, se exploró la aplicabilidad de los modelos AERMOD de pequeña área para los análisis epidemiológicos.

En el último y tercer capítulo se presentan los resultados del análisis epidemiológico de la morbilidad y mortalidad para eventos en salud asociados a la calidad del aire para cada uno de los municipios del AMVA entre 2008 y 2015 como línea de base, así mismo se reportan los resultados de la asociación entre los niveles de la concentración diaria de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  y el número de casos de enfermedad o muertes por los eventos centinela; finalmente se presentan los resultados de la exploración del impacto en la morbimortalidad y en los servicios de salud del fenómeno de episodios de contaminación atmosférica.

En cada capítulo se remite al lector a los anexos específicos donde se puede consultar los informes ampliados de cada uno de los componentes, en los que se detallan los asuntos metodológicos y analíticos explorados, y se presentan los hallazgos pormenorizados de cada análisis. Igualmente se incluyen las principales conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.



## TABLA DE CONTENIDO

PRÓLOGO .....	7
INTRODUCCIÓN .....	11
RESUMEN .....	21
1. Capítulo 1.	
REVISIÓN DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA Y MAPEO DE REDES DE INVESTIGACIÓN Y CONOCIMIENTO.....	23
1.1. Revisión de la literatura.....	25
1.1.1. Metodología.....	25
1.1.2. Resultados de la revisión de la literatura científica.....	27
1.2. Mapping review.....	34
1.2.1. Metodología.....	34
1.2.2. Resultados del mapping review.....	36
1.3. Conclusiones .....	42
2. Capítulo 2.	
ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ Y MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	45
2.1. Objetivo.....	46
2.2. ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ.....	46
2.2.1. Componente metodológico.....	46
2.2.2. Resultados.....	49
2.3. MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS .....	59
2.3.1. Componente metodológico.....	59
2.3.2. Resultados.....	62
2.4. Conclusiones .....	69
3. Capítulo 3.	
CALIDAD DEL AIRE Y MORBIMORTALIDAD EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ 2008-2015.....	71
3.1. Objetivos.....	72
3.2. Componente metodológico.....	72
3.2.1. Población y periodo de estudio.....	72
3.2.2. Estrategia del estudio .....	72
3.2.3. Fuentes de información .....	75
3.2.4. Estrategia informática.....	75
3.2.5. Análisis estadístico.....	77
3.2.6. Identificación de eventos y casos .....	79
3.2.7. Recursos informáticos.....	80
3.2.8. Consideraciones éticas.....	80
3.3. Resultados.....	80
3.3.1. Morbilidad por eventos centinela asociada a los contaminantes $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ y $O_3$ .....	80
3.3.2. Mortalidad por los eventos centinela asociada a los contaminantes $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ y $O_3$ .....	84
3.3.3. Efectos en la salud asociados a episodios de contaminación en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015-2016.....	87
3.4. Conclusiones .....	93
RECOMENDACIONES.....	97
Fortalecimiento de políticas y medidas Institucionales .....	97
Fomento de la investigación .....	98
Mejoramiento de los sistemas de información.....	99
GLOSARIO.....	101
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	103
REFERENCIAS.....	105





## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Tesaurus Mesh y DeCS utilizados en la revisión de la literatura, relación entre contaminación del aire urbano y sus efectos en la salud. ....	26
Tabla 2.	Distribución según tipo de estudio de los artículos seleccionados para la revisión.....	28
Tabla 3.	Estudios colombianos sobre la relación contaminación del aire y salud publicados en revistas Q1 y Q2 de Scimago.....	33
Tabla 4.	Plataformas de Ciencia, Tecnología e Innovación utilizadas en el mapping review para la validación de datos de investigadores en calidad del aire y salud. ....	37
Tabla 5.	Áreas y disciplinas con mayor participación en los estudios de contaminación atmosférica y salud.....	34
Tabla 6.	Distribución por países de investigadores, grupo e instituciones incluidos en el mapeo.....	38
Tabla 7.	Instituciones colombianas que han investigado la asociación contaminación atmosférica y salud en el periodo 2008-2016.....	39
Tabla 8.	Grupos de investigación colombianos que han estudiado la asociación contaminación atmosférica y salud, 2008 - 2016.....	40
Tabla 9.	Métodos propuestos para la imputación de los valores no disponibles en las series de contaminantes.....	47
Tabla 10.	Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, Resolución 610 de 2010 y Guías de Calidad del Aire de la OMS.....	49
Tabla 11.	Listado de series utilizadas para la construcción de las series ensambladas.....	51
Tabla 12.	Concentraciones máximas de contaminantes para periodos de 24 horas, un mes y un año, reportadas por estaciones de la Red de Monitoreo y modeladas por AERMOD.....	64
Tabla 13.	Concentraciones promedio anuales de PM <sub>2,5</sub> registradas por estaciones de la red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Fuente: plataforma MODEAM.....	65
Tabla 14.	Concentraciones promedio anuales de PM10 registradas por estaciones de la red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Fuente: plataforma MODEAM.....	66
Tabla 15.	Población de los municipios del AMVA, proyectada por el DANE para el año 2017.....	73
Tabla 16.	Eventos centinela seleccionados según grupo diagnóstico de clasificación CIE-10.....	74
Tabla 17.	Distribución de los eventos centinela por municipio: AMVA, 2008-2015.....	81
Tabla 18.	Magnitud del riesgo para enfermedad respiratoria, asociada al incremento de 10 µg/m <sup>3</sup> en el promedio diario de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> y O <sub>3</sub> , por municipios de AMVA 2008-2015 (rezago 0-15).....	83
Tabla 19.	Magnitud del riesgo para enfermedad circulatoria, asociada a de 10 µg/m <sup>3</sup> en el promedio diario de PM <sub>2,5</sub> y O <sub>3</sub> por grupos poblacionales, Medellín 2008-2015 (rezago 0-15).....	84
Tabla 20.	Defunciones por eventos centinela y peso relativo respecto al total de defunciones por municipio. Municipios del AMVA. 2008 – 2015.....	85
Tabla 21.	Magnitud del riesgo de muertes por eventos centinela asociado al incrementode 10 µg/m <sup>3</sup> en el promedio diario de PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> y O <sub>3</sub> , Medellín 2008-2016 (rezagos 0-7).....	86
Tabla 22.	Riesgo de urgencias y de diagnósticos de enfermedades respiratorias y circulatorias asociado al incremento de 10 µg/m <sup>3</sup> en el promedio diario de PM <sub>2,5</sub> durante los días de episodios en Medellín, 2015.....	89
Tabla 23.	Niveles de alertas según Acuerdo Metropolitano No 15 de 2016-AMVA.....	90
Tabla 24.	Riesgo de infarto Agudo de Miocardio (IAM) en población de 65 o más años, por aumento diario de 10µg/m <sup>3</sup> en PM <sub>2,5</sub> durante los episodios de Medellín, 2015.....	92



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Proceso metodológico desarrollado para la revisión sistemática .....	25
Figura 2.	Proceso de selección de documentos para la revisión bibliográfica.....	27
Figura 3.	Esquema metodológico del mapping review.....	34
Figura 4.	Estrategias para la identificación y selección de investigadores en calidad del aire y salud .....	36
Figura 5.	Distribución de instituciones que han participado en la investigación de calidad de aire y salud, según su carácter .....	37
Figura 6.	Serie de PM <sub>10</sub> registrada en la estación EST-MAGO .....	50
Figura 7.	Serie de tiempo de concentraciones de PM <sub>2.5</sub> de las estaciones de monitoreo de Medellín entre 2008 y 2016.....	51
Figura 8.	Serie de tiempo combinada de PM <sub>2.5</sub> en Medellín entre 2008 y 2016. ....	51
Figura 9.	Porcentaje de días de excedencias máximo a la norma colombiana para cada contaminante, por municipio.....	52
Figura 10.	Porcentaje de días de excedencias máximo a las Guías de la OMS para cada contaminante, por municipio.....	53
Figura 11.	Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de PM <sub>10</sub> de los municipios del Valle de Aburrá .....	53
Figura 12.	Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de PM <sub>2.5</sub> de los municipios Caldas, Itagüí y Medellín.....	57
Figura 13.	Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de O <sub>3</sub> de los municipios del Valle de Aburrá ..	58
Figura 14.	Concentraciones máximas de material particulado PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) en 19 receptores seleccionados, para un periodo de 24h, escenario tres .....	63
Figura 15.	Distribución espacial de las concentraciones de PM <sub>10</sub> para el año 2014.....	67
Figura 16.	Distribución espacial de las concentraciones de PM <sub>2.5</sub> para el año 2014, Valle de Aburrá. ....	68
Figura 17.	Procesamiento de los datos utilizados en el Estudio: Proceso ETL.....	76
Figura 18.	Evolución de los niveles de concentración diaria de PM <sub>10</sub> en Medellín, 2015-2016.....	86
Figura 19.	Evolución de los niveles de concentración diaria de PM <sub>2.5</sub> en Medellín, 2015-2016 .....	88
Figura 20.	Evolución de los niveles de concentración diaria de PM <sub>2.5</sub> en Girardota, 2015-2016.....	88
Figura 21.	Porcentaje de excesos de riesgo de morbilidad durante los días de episodios de PM <sub>2.5</sub> Medellín, 2015.....	90
Figura 22.	Porcentaje de excesos en los riesgos de morbilidad durante los periodos de alerta roja y alerta naranja, Medellín, 2015 .....	91





---

## LISTA DE ANEXOS

- Anexo 1.** Revisión de literatura mundial sobre calidad del aire y salud
- Anexo 2.** Revisión de literatura calidad del aire y salud en 5 países de Iberoamérica
- Anexo 3.** Mapping review de los grupos e investigadores nacional e internacional que han abordado la relación calidad del aire y salud
- Anexo 4.** Tendencia de las concentraciones de contaminantes criterio en el Valle de Aburrá, 2008-2016.
- Anexo 5.** Modelo AERMOD de dispersión de los contaminantes en el Valle de Aburrá 2008-2016
- Anexo 6.** Asociación entre la exposición de corto plazo a  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  y eventos centinela de salud en los municipios del Valle de Aburrá, 2008-2015.
- Anexo 7.** Estimación de parámetros de modelos aditivos generalizados de la asociación entre calidad del aire y morbimortalidad en los diez municipios del Valle de Aburrá, 2008-2015.
- Anexo 8.** Gráficas de validación de modelos aditivos generalizados de la asociación entre contaminantes atmosféricos y morbimortalidad en los diez municipios del Valle de Aburrá, 2008-2015
- Anexo 9.** Estimación de los efectos en morbilidad y mortalidad durante los episodios atmosféricos de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en Medellín, 2015.





## RESUMEN

La mala calidad del aire es la mayor amenaza ambiental para la salud pública y el mayor reto político para los gobiernos de los territorios. Numerosos estudios han investigado la relación entre la contaminación del aire urbano y los eventos de salud y han corroborado su carácter local y la necesidad de información actualizada para la toma de decisiones. Esta investigación estableció la asociación entre el promedio diario de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y ozono y los casos diarios de morbilidad y mortalidad según eventos centinela respiratorios y cardiovasculares en los 10 municipios del Valle de Aburrá. Se llevó a cabo para el período 2008-2015 un estudio de series de tiempo tipo Modelo Aditivo Generalizado de regresión de Poisson, el cual utilizó la información disponible en la red de monitoreo de calidad del aire de AMVA, los registros individuales de prestación de servicios de salud, los registros de Sistema Integrado de Información de la Protección Social y del Departamento Nacional de Estadísticas. Para la mayoría de los municipios, se observaron tendencias decrecientes en las concentraciones diarias de  $PM_{10}$  y crecientes para  $PM_{2.5}$  y ozono, así como un aumento en los días con excedencias desde 2014. Se establecieron asociaciones entre el efecto acumulado de 15 días del aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el promedio diario de los contaminantes de estudio y el incremento en el riesgo de morbilidad por eventos centinela de tipo respiratorios y circulatorios. Así mismo se encontraron asociaciones significativas entre el efecto acumulado de 7 días en el aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el promedio diario de los contaminantes y la mortalidad por eventos centinela para la ciudad de Medellín. Al comparar los días de episodios atmosféricos por  $PM_{2.5}$  ocurridos en Medellín entre febrero y abril de 2015 con los días por fuera del episodio, se encontraron excesos de morbilidad y uso de servicios de urgencias en menores de 5 años debido a neumonía, infección respiratoria aguda y crisis asmáticas.





## CAPÍTULO 1

# REVISIÓN DE LA LITERATURA ESPECIALIZADA Y MAPEO DE REDES DE INVESTIGACIÓN Y CONOCIMIENTO.

La investigación sobre los efectos del deterioro de la calidad del aire sobre la salud humana ha presentado importantes avances. El estado del arte actual de estas investigaciones permite identificar los eventos en salud relacionados con la mala calidad del aire, a partir de la comprensión de los procesos fisiopatológicos que explican el daño en el organismo, de la descripción de la morbilidad y mortalidad generada y el cálculo de la carga de enfermedad atribuible a este factor de riesgo ambiental, y al aporte al “análisis causal” de la relación salud-contaminación en virtud del análisis crítico de las metodologías utilizadas y el manejo de datos (Dominici, 2017). Así mismo, muestra el avance metodológico y teórico desarrollado en la última década en la generación de conocimiento en salud ambiental con la integración de disciplinas de áreas como la ingeniería, la matemática, las ciencias de los datos y analítica, las ciencias de la salud incluidas las ciencias básicas, áreas que han aportado en el diseño e implementación de técnicas de medición y de modelación de la exposición a los contaminantes de individuos y poblaciones, la formulación de procesos de análisis estadísticos y modelos heurístico lineales y no lineales y la identificación de bio-marcadores de tipo genético y fisiológico del daño a la salud.

Con la finalidad de establecer los procesos de producción de nuevo conocimiento a nivel local, regional y mundial, en el componente de revisión documental, se recopilaron los resultados y metodologías de estudios epidemiológicos asociados con la calidad del aire, que fueron reportados en las revistas de mayor impacto académico entre 2008 y 2016; además se identificaron las redes y grupos de investigación que trabajaron activamente en el tema en el ámbito regional, nacional y territorial. Estos ejercicios permitieron configurar los marcos teóricos necesarios para la investigación epidemiológica y reconocer los expertos temáticos que colaboraron en la discusión de los asuntos metodológicos críticos y los hallazgos del proyecto general.



Para cumplir con la finalidad del componente se diseñaron dos procesos de revisión de fuentes documentales. En primera medida se realizó una revisión de la literatura a partir de un proceso sistemático de búsqueda, selección y análisis de las publicaciones disponibles en las bases de datos y de indexación científica. La revisión se enfocó en las investigaciones epidemiológicas, y de cada documento se exploró: 1) el nivel de observación (poblacional e individual) de los impactos para la salud humana; 2) el diseño de la investigación (estudios ecológicos, cohortes, casos cruzados, transversales, entre otros), 3) el nivel de exposición (gran área- nivel municipal, pequeña área - nivel barrial o conjunto de barrios y nivel individual), 4) la duración de la exposición (larga- años o corta- horas/días), 5) el contaminante ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $O_3$ ,  $NO_2$  entre otros), y 6) los efectos en la salud en general (mortalidad, morbilidad y atención sanitaria) o por sistemas específicos (cardiovascular, respiratorio, neurológico, entre otros).

Para identificar las redes y grupos de investigación, se desarrolló un ejercicio de mapping review, una de las estrategias de revisión sistemática que centra la mirada en los productores de conocimiento con el objetivo de identificar los actores claves, el desarrollo en ciencia y tecnología, las tendencias de investigación, las redes de colaboración, etc. El mapeo, como también es denominado, permitió establecer relaciones entre ideas, argumentos y conceptos, y proporcionó una visión general del desarrollo del campo de investigación a partir de distintas fuentes documentales de tipo formal e informal, institucionales y periodísticas.

En este capítulo se presentan los principales resultados de los procesos de revisión, los cuales, para facilitar su lectura y comprensión, se han ordenados en función de cada proceso a partir de su propuesta metodológica y sus resultados específicos. Al final se presentan algunas conclusiones importantes derivadas de los análisis de documentos.

## 1.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

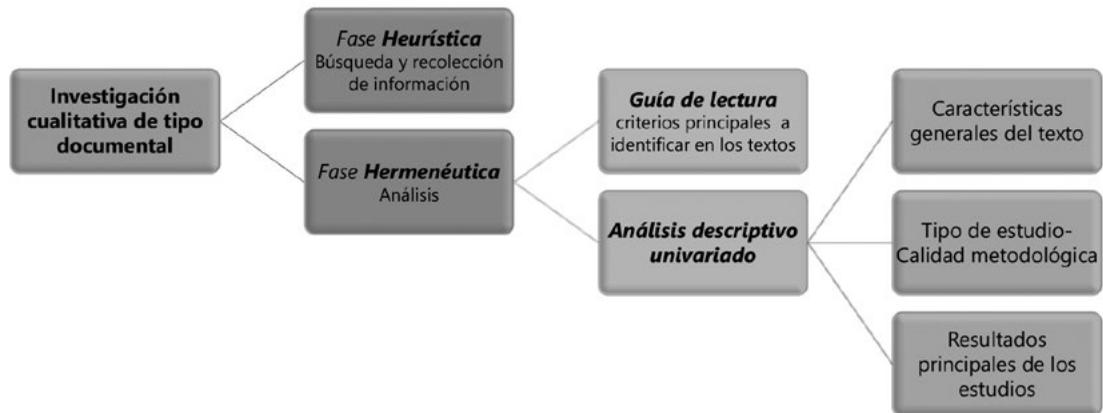
Se diseñó una investigación cualitativa de tipo documental para recuperar el conocimiento acumulado sobre los estudios epidemiológicos de la relación entre la calidad del aire urbano y la salud. Este proceso fue orientado a la interpretación y comprensión crítica y objetiva del conocimiento, un ejercicio hermenéutico para avanzar en la sistematización del material analizado.

### 1.1.1 METODOLOGÍA

El proceso se estructuró en dos fases, una heurística (recolección de la información) y otra hermenéutica (el análisis) el cual fue llevada a cabo mediante tres procesos: a) la limitación de los textos, b) la clasificación de los trabajos consultados, y c) la categorización de los textos a partir de su contenido, e identificación de los aportes al área de investigación (**Figura 1**).



**Figura 1.** Proceso metodológico desarrollado para la revisión sistemática



## Fase heurística

Esta etapa de orden preparatoria, incluyó la búsqueda y recopilación de fuentes de información según su naturaleza y características, la aproximación al objeto de estudio, la delimitación y definición de estrategias particulares de búsqueda, recuperación y almacenamiento de información:

### Búsqueda de fuentes de información

Se usaron nueve bases de datos bibliográficas a las que se accedió a través de la Hemeroteca Digital de la Universidad de Antioquia (Pubmed, BVS Lilacs, Medline, Scielo, Redalyc, Bireme, Ovids, Dialnet, Google Scholar). Los criterios de búsqueda utilizados fueron: 1) tipo de texto: artículos resultantes de proyectos de investigación; 2) tema: relación entre contaminación del aire y salud; 3) idiomas: español, portugués e inglés; 4) periodo de publicación: 2008- 2016; y 5) clasificación de la revista: cuartiles 1 y 2 según SCImago.

Se utilizaron términos claves y conectores booleanos (AND y OR) usando los tesauros Mesh y DeCS relacionados en la **Tabla 1**. Se combinaron los términos y construyeron ecuaciones de búsqueda que incluyeran un término ambiental y de salud en cada uno de los distintos idiomas por ejemplo: "Contaminación del aire AND Salud", "Air Pollution AND Health" o "Poluição do Ar AND Saúde"



**Tabla 1.** Tesoros Mesh y DeCS utilizados en la revisión de la literatura, relación entre contaminación del aire urbano y sus efectos en la salud.

Español	Inglés	Portugués
Contaminación del aire	Air Pollution	Poluição do Ar
Contaminantes del Aire	Air Pollutants	Poluentes do Ar
Material Particulado	Particulate Matter	Material Particulado
Salud	Health	Saúde
Enfermedades Respiratorias	Respiratory Tract Diseases	Doenças Respiratórias
Enfermedades Cardiovasculares	Cardiovascular Diseases	Doenças Cardiovasculares
Accidente Cerebrovascular	Stroke	Accidente Vascular Cerebral
Neoplasias	Neoplasms	Neoplasias

## Selección de los estudios

Inicialmente, se obtuvo un listado de documentos con los términos claves en títulos y resúmenes; estos textos fueron leídos completamente y se excluyeron aquellos que: 1) no eran estudios epidemiológicos; 2) sólo abordaban los impactos de salud o la contaminación; 3) no eran artículos originales de investigaciones empíricas; 4) estudiaron contaminación intradomiciliaria; 5) otros contaminantes diferentes a material particulado  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , e Hidrocarburos aromáticos policíclicos; 6) el impacto en la salud eran cambios fisiológicos o clínicos; y 7) no presentaban el cambio o nivel de concentración de los contaminantes estudiados.

## Fase hermenéutica.

A los textos se les aplicó una guía de lectura para identificar categorías de interés como: 1) el diseño del estudio, 2) el nivel de observación (poblacional o individual), 3) los contaminantes, 4) la medición de la exposición, 5) los eventos en salud, 6) la medición del efecto y 7) las variables de ajuste. Inicialmente se realizó un análisis descriptivo de cada texto en aspectos tales como el lugar de estudio, los autores, la revista de publicación, la clasificación de la revista y el año de la publicación y aspectos relacionados con la calidad metodológica. Finalmente se analizó el conjunto de los artículos seleccionados para describir un panorama de las relaciones encontradas entre los contaminantes atmosféricos y sus impactos en la salud según los principales diseños de investigación utilizados.



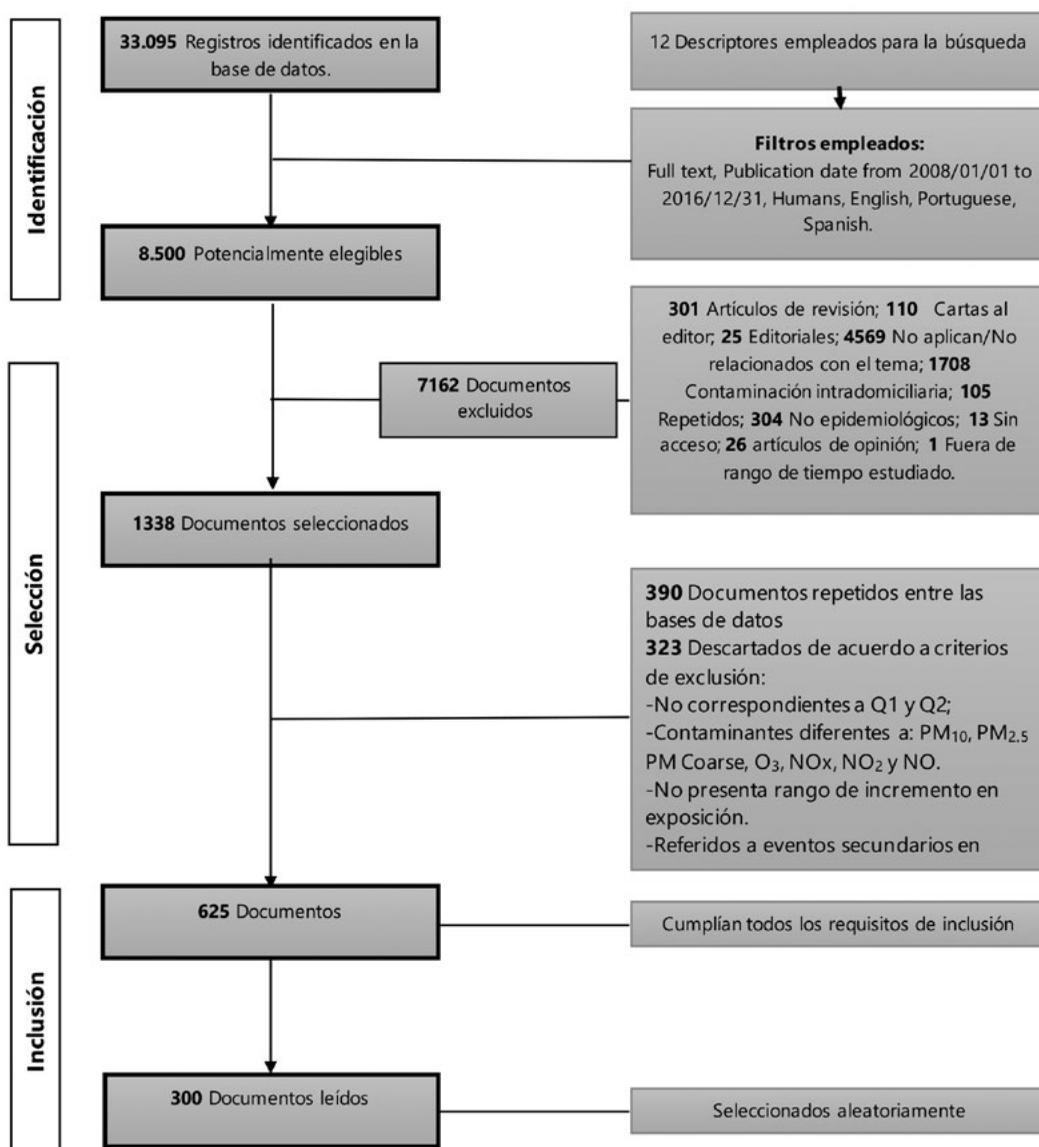


## 1.1.2 RESULTADOS DE LA REVISIÓN DE LA LITERATURA CIENTÍFICA

### Análisis de la búsqueda

En total se encontraron 8.500 textos potencialmente elegibles, que se redujeron a 1.338 documentos al aplicar los criterios de inclusión, y de los cuales 713 se excluyeron por distintas razones. Finalmente 625 artículos cumplieron criterios de selección, de los cuales se escogieron aleatoriamente 300 para su lectura (**Figura 2**).

**Figura 2.** Proceso de selección de documentos para la revisión bibliográfica





La región que más aportó estudios fue la de las Américas con 107 textos (66 de Estados Unidos y Canadá y 41 de Latinoamérica y el Caribe), seguida de la de Europa con 92. Asia con 87, Oceanía con 2 y África con uno. Once textos correspondían a estudios que analizaron datos de distintas regiones del mundo.

El diseño de investigación epidemiológica que con mayor frecuencia se utilizó fue el estudio ecológico de series de tiempo (78 de 300), seguidos de los estudios de cohorte (65 de 300), y estudios case crossover (44 de 300) (**Tabla 2**).

**Tabla 2.** Distribución según tipo de estudio de los artículos seleccionados para la revisión

Tipo de estudio (Referencias)	Número de Estudios
Ecológicos de series de tiempo	78
Cohorte	65
Case crossover	44
Ecológicos-Otros	36
Casos y controles	26
Meta-análisis	20
Transversal	19
Cuasi-experimental	2
Otros*	10
<b>TOTAL</b>	<b>300</b>

\* incluyeron los estudios de tipo longitudinal, ensayo aleatorizado, exploratorio, retrospectivo y caso único.

El contaminante más estudiado en relación a los eventos en salud fue el material particulado, principalmente la fracción de  $PM_{10}$  (22%) y de  $PM_{2.5}$  (17,2%). Entre los contaminantes gaseosos, con mayor frecuencia se estudiaron el  $NO_2$  y  $O_3$  con un 17% y 15,3% respectivamente. Todos hacen parte de los contaminantes priorizados por la OMS, por su importancia en salud pública (OMS, 2017). Aunque pocos, se destacaron algunos estudios que relacionaron el riesgo de morir con las fracciones de material particulado específicamente la de carbono elemental y de compuestos azufrados y el efecto de la exposición a múltiples contaminantes. Estos estudios revelaron la emergencia de nuevos campos de análisis como la caracterización de fracciones químicas y el estudio de las mezclas de contaminantes.

La revisión reveló diferentes formas de establecer la exposición a los contaminantes: 1) la exposición poblacional o municipal, que es inferida de los datos de las redes de monitoreo de calidad del aire en territorios específicos; 2) la exposición de área pequeña (<1 km<sup>2</sup>) o barrial, aproximación al nivel individual, a partir de modelos de dispersión de tipo gaussiano o de regresión de uso de suelo; y 3) exposición individual, material particulado inhalado con técnicas de monitoreo individual. Aunque el 72.8% de los estudios establecieron la exposición a nivel poblacional, sólo el 21.4% utilizaron modelos de dispersión y en el 5,8% se realizaron monitoreos personales.





La exposición al factor de riesgo (contaminantes) es un aspecto fundamental para avanzar en el establecimiento de la relación de causalidad asociada a la plausibilidad epidemiológica; se estableció que el impacto sobre la salud ha sido documentado mediante la relación de los niveles de contaminación con eventos de mortalidad, morbilidad y atención de los servicios de salud. Estos eventos, tanto crónicos como agudos, correspondieron a distintos sistemas y órganos y son el reflejo de exposiciones de corto o largo plazo que se han establecido en la población general y en grupos poblacionales específicos. El grupo de eventos que más reportaron los artículos revisados fueron los eventos de morbilidad (139 de 300), seguido por los relacionados con la asistencia a servicios de salud (78 de 300) y la mortalidad (77 de 300); seis estudios indagaron por eventos de varias de estas categorías.

Entre los eventos de morbilidad, las enfermedades respiratorias se estudiaron con mayor frecuencia (43,2%), seguidas de las enfermedades cardiovasculares (11.5%), los eventos cerebrovasculares (10.8%), y distintos tipos de cáncer (8,6%). Otros eventos, como los ginecobstétricos, de salud mental, las alteraciones neurológicas no vasculares, las enfermedades metabólicas, las alergias, los eventos inflamatorios y los problemas oftalmológicos, fueron estudiados con menor frecuencia y evidenciaron el amplio espectro de problemas y la amplitud de daños en el organismo que se han asociado con la contaminación del aire.

En cuanto al estudio de las defunciones, la mayoría de los textos indagaron por la mortalidad en general (el conjunto de defunciones por causas no accidentales) (48,1% de los 77 textos), el 51.9% se enfocaron en la mortalidad por causas específicas como el cáncer, los accidentes cerebrovasculares, las enfermedades respiratorias, las cardio-respiratorias y cardiovasculares.

La hospitalización fue el evento de atención en los servicios de salud más estudiado en las investigaciones (43,6%), seguido por las consultas a los servicios de urgencias (34,6%) y la consulta ambulatoria (14,1%). En menor medida los textos indagaron por el uso de varios servicios durante de atención sanitaria<sup>1</sup> (5,3%) y algunos servicios como despacho de ambulancias y recuento de procedimientos<sup>2</sup> (2.6%).

En la mayoría de los estudios (53,3%), los efectos en la salud se establecieron en la población en general<sup>3</sup>, seguido de estudios realizados en población pediátrica (23,3%). En menor medida, se evaluaron los efectos en adultos mayores (5,7%). Muy pocas investigaciones se enfocaron en características asociadas a los determinantes sociales de la salud como grupos étnicos particulares afrodescendientes y latinos (n=2), grupos ocupacionales (n=2), y según el nivel socioeconómico (n=1).

En concordancia con los objetivos de la revisión, se hizo énfasis en tres diseños principales que permiten establecer los eventos de salud relacionados con el tiempo de exposición a los contaminantes.

---

1 Varios tipos de atención sanitaria: esta categoría incluye la combinación de asistencia a servicios de urgencias, consulta externa, hospitalización y despacho de ambulancia

2 Recuento de procedimientos: se refiere al conteo de procedimientos realizados en los servicios asistenciales por un único evento, ejemplo, número de nebulizaciones e inhalaciones por alteración respiratoria.

3 La categoría de población general se aplica en aquellos estudios que no especifican grupos etarios determinados.



## a. Exposiciones de corta duración (horas o días)

Dos diseños permiten establecer la asociación de corto plazo a los contaminantes, los estudios ecológicos de series de tiempo y los estudios case- crossover.

### Estudios ecológicos de series de tiempo

Es el diseño más empleado para establecer la situación de salud, donde la unidad de observación son las poblaciones de diferentes áreas geográficas o periodos de tiempo en una misma área (Borja-Aburto, 2000). Entre sus ventajas está la fácil disponibilidad de datos, dado que comúnmente se emplean los registros rutinarios de la vigilancia en salud pública y el monitoreo de calidad del aire. En este diseño se privilegia la medición poblacional, especialmente las dimensiones de contexto que no pueden ser explicadas en el ámbito individual y que sustentan evaluar propuestas de intervención.

Estos estudios comparan las variaciones temporales de las concentraciones promedio de los contaminantes con los cambios en las frecuencias de los eventos de salud. La unidad temporal más estudiada es el "día", que refleja la asociación de la contaminación con eventos de tipo agudo.

Su limitante más importante es la dificultad para establecer la inferencia causal, debido a: 1) los cambios en tiempo de los criterios diagnósticos de enfermedad, 2) la dificultad de establecer los periodos de latencia entre exposición y efecto, 3) la calidad y cobertura de los datos de exposición y de salud, y 4) la medición de co-variables agregadas que puedan producir confusión. Otra cuestión problemática es la llamada falacia ecológica, que consiste en hacer inferencias individuales a partir de estudios de grupo, error que habitualmente se comete por parte de los epidemiólogos y salubristas, quienes sobrevaloran su rol en la comprensión de la realidad en salud.

Entre los 78 estudios, 61 fueron desarrollados en una sola ciudad o región, y 17 en múltiples ciudades. Entre estos últimos se destacan el Estudio de Calidad del Aire y Salud en Latinoamérica-ESCALA, realizado en 9 ciudades (Romieu et al., 2012) y el Public Health and Air Pollution in Asia-PAPA, realizado en 4 ciudades de Asia (Wong et al., 2008). Los periodos abordados por las investigaciones mostraron tiempos de observación amplios que variaron entre uno y 19 años.

En términos de la exposición poblacional y su impacto en salud, la mayoría evaluó el incremento o disminución en la presentación de eventos centinela asociados con las variaciones de la concentración diaria de contaminantes críticos, principalmente la variación 10 unidades, el mismo día del incremento, el efecto puntual luego de 1 a 20 y el efecto acumulado hasta 15 días luego del cambio.

La mortalidad fue el evento estudiado con mayor frecuencia y los textos reportaron asociaciones entre el incremento  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de los contaminantes y la frecuencia de las defunciones por: 1) todas las causas de tipo natural (0.4% a 3,1%), 2) los eventos respiratorios (0.4% a 14,3%) y 3) los eventos circulatorios (0.3% a 7,5%).

Después de la mortalidad, la atención en los servicios de salud fue el evento más estudiado (37 textos). En cuanto a las hospitalizaciones (18 textos), se desatacó el aumento en la frecuencia de este evento por todas las causas de morbilidad general (5,4%), las enfermedades respiratorias (entre 0.8% y 15%), y los eventos cardiovasculares (2.1% y 6,5%) asociadas al incremento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  de contaminantes como:  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$ .





Catorce textos exploraron el comportamiento de las consultas de urgencias asociadas al incremento diario (10 unidades) de la concentración de los contaminantes ( $PM_{2.5}$ ,  $O_3$  y  $SO_2$ ) y como hallazgos más importantes se reportó el incremento en las urgencias por causas respiratorias (entre 15% y 28%) principalmente en la población pediátrica y las cardiovasculares agudas (entre 1.9% y 18,9%) en la población adulta y mayor de 65 años. Así mismo se destacó el aumento en las consultas a los servicios ambulatorios principalmente por asma y enfermedades inflamatorias agudas del aparato respiratorio (entre 6,3% y 11.1%) asociadas a  $PM_{10}$  y  $SO_2$  (Anexos 1 y 2).

La morbilidad fue estudiada en el 9,0% (7 de 78) de las investigaciones de series de tiempo, en las cuales se determinó el incremento en la frecuencia de casos incidentes asociados a la contaminación. En cuanto a los eventos respiratorios, un estudio buscó establecer la relación entre la salud respiratoria en pacientes con EPOC y diferentes contaminantes, sin encontrar resultados significativos.

Al contrario, en la morbilidad por eventos neurológicos se evidenció el incremento de 3,2% en los casos de epilepsia asociados al aumento de  $10\mu g/m^3$  de  $NO_2$ , y el incremento de 51.5% en los casos de accidente cerebrovascular asociado al aumento de  $10\mu g/m^3$  de  $O_3$ . También se destacó la asociación del incremento de 15,5% de la morbilidad ginecobstétrica (los nacimientos prematuros y el bajo peso al nacer) asociada a  $PM_{2.5}$  (Ramos-Herrera S, Bautista-Margulis, & Valdez-Manzanilla, 1984) (Anexos 1 y 2).

## Estudios Case- Crossover

El diseño de case crossover o casos cruzados, es un tipo de estudio epidemiológico observacional para valorar si alguna exposición intermitente o inusual ha desencadenado un evento agudo o a muy corto plazo (Maclure, 1991; Levy et al., 2001). Este diseño se utiliza especialmente en epidemiología ambiental. Entre sus ventajas ofrece una mayor precisión en el establecimiento de la relación de causalidad entre la exposición y los eventos en salud debido al control de sesgos de selección y la eliminación de posibles confusores como la edad, la ocupación, el sexo y otras características fijas (conocidas y desconocidas, medibles y no medibles). Al ejercer estos controles, desde su diseño, puede expresarse mejor la contaminación como un potencial factor de riesgo para la salud (Lee et al 1999; Neas et al 1999; Carracedo-Martínez et al, 2009).

Cuarenta y cuatro de los textos reseñados correspondieron a diseños case crossover, la mayoría fueron realizados en Asia y en Europa (cada uno con 17 textos). Al igual que los diseños de series de tiempo, el 95,5% de los estudios obtuvieron los datos de la exposición de las redes de monitoreo de calidad del aire, además asumieron cada registro de los sistemas de información de salud como casos individuales. Los periodos de observación fluctuaron entre algunos meses y 14 años.

El método de este tipo de estudios supone que tanto la exposición como el tiempo entre la exposición y el evento son breves, por lo que sólo es adecuado para evaluar efectos de corto plazo, y al igual que en las series de tiempo, estos diseños consideraron los retrasos o rezagos en la exposición como uno de los patrones a tener en cuenta en la relación entre la exposición y el efecto. La mayoría de los estudios evaluó el impacto en salud asociado con el incremento de  $10mg/m^3$ , con rezagos entre 0 y 7 días.

Los estudios reportaron distintas medidas para estimar la magnitud de la relación entre la exposición a los contaminantes y los eventos en función del riesgo (la mayor probabilidad de que un evento o resultado se presente en relación con una exposición específica), los cuales se pueden expresar en términos del porcentaje de exceso de riesgo (el porcentaje en que se incrementa la probabilidad de que un evento se presente).



La asistencia a servicios de salud se estudió en el 50% de los textos que abordaron este diseño, seguido de la mortalidad en el 29,5% y la morbilidad en el 18,2%. En el anexo 1 se resumen algunos de los hallazgos más importantes de los estudios que abordaron este diseño.

## b. Exposiciones de larga duración (años)

Los estudios de cohorte son diseños de investigación que permiten evaluar la exposición a largo plazo a la contaminación y su relación con eventos de tipo crónico. La característica fundamental de este tipo de estudios es que los sujetos de investigación son elegidos de acuerdo con la exposición de interés; en este caso la población se elige en función de un nivel diferencial de concentración del contaminante, estableciéndose un grupo con menor y mayor exposición. (Lazcano-Ponce, Fernández, Salazar-Martínez, & Hernández-Avila, 2000).

Los estudios de cohorte se han utilizado para establecer la ocurrencia de eventos nuevos entre los grupos de individuos con diferente grado de exposición, permitiendo establecer la incidencia de la enfermedad o del evento, así como el peso específico de la exposición sobre su ocurrencia; es un diseño que permite establecer el riesgo individual asociado a la exposición (Lazcano-Ponce et al., 2000).

Entre los documentos revisados, 65 correspondieron a estudios de seguimiento, 22 de ellos realizados en países europeos y 20 en países americanos angloparlantes.

Uno de los asuntos críticos en este tipo de estudios es determinar el grado de exposición de los individuos incluidos, lo cual para 44 de los textos revisados se logró utilizando distintas técnicas de modelación (LUR, Kriging, entre otros) de la concentración de los contaminantes en el espacio como una aproximación a nivel individual o mediante medición directa. En este tipo de estudios, cabe destacar, que se eligen generalmente para evaluar los efectos a mediano y largo plazo de las exposiciones ambientales por lo que los tiempos de observación no son cortos (Brunekreef, 2011). En las cohortes estudiadas los tiempos de observación oscilaron desde semanas hasta más de 20 años.

Entre los aportes identificados se desatacaron las publicaciones derivadas del proyecto ESCAPE European Study of Cohorts for Air Pollution Effects con más de 30 estudios de cohorte europeos, que incluyeron alrededor de 900.000 sujetos. Su objeto fue cuantificar los impactos en la salud por la contaminación atmosférica, mediante el uso de metodologías que permitieran reducir la incertidumbre de esta relación y una mejor aproximación a la relación de causalidad. ESCAPE también puso a prueba nuevas hipótesis sobre los efectos específicos en salud, y contemplaron la caracterización de química del material particulado.

Los eventos en salud más estudiados con estos diseños fueron los referidos a la morbilidad de tipo crónica (cáncer o eventos de tipo inflamatorios) que correspondieron a un 78,5% (51 de 65) de los estudios.

## c. Estudios colombianos

Durante la búsqueda se identificaron 17 estudios realizados en Colombia, de los cuales se destacaron como reportes de alta calidad tres series de tiempo que establecieron la asociación del incremento diario de  $PM_{10}$  en el riesgo de morir por causas respiratorias y cardiovasculares (Blanco-Becerra, 2014a; Blanco-Becerra, 2014b) y su correlación con morbilidad respiratoria (Gaviria, 2011); y 3 estudios prospectivos con seguimientos de un año que determinaron un riesgo aumentado para síntomas y afecciones respiratorias agudas asociado al incremento de partículas



totales, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (Hernández- Flores, 2013; Rodríguez Villamizar, 2010; Herrera Torres, 2011). Los estudios restantes fueron exploratorios o transversales y permitieron aproximaciones al fenómeno de salud asociado a la contaminación del aire aunque con un alto nivel de incertidumbre (Tabla 3). En el anexo 2 se encuentra mayor detalle de los estudios colombianos.

**Tabla 3.** Estudios colombianos sobre la relación contaminación del aire y salud publicados en revistas Q1 y Q2 de Scimago

Autor (año)	Sitio del estudio	Tipo de estudio	Contaminantes	Evento en salud	Resultados	IC (95%)
Hernández Flórez, et al 2013	Bogotá	Estudios prospectivos	Partículas totales. Exposición > 150µg/m <sup>3</sup>	Tos con expectoración	Riesgo relativo: 1.2	1.0; 1.4
				Rinorrea	Riesgo relativo: 1.1	1.0; 1.2
				Ausentismo escolar	Riesgo relativo: 1.7	1.3; 2.3
				Sibilancias	Riesgo relativo: 1.3	1.0; 1.6
Rodríguez Villamizar et al 2010	Bucaramanga	Estudios prospectivos	PM <sub>10</sub> . Variaciones de 10µg/m <sup>3</sup>	Síntomas respiratorios	Razón de prevalencia: 1.09	0.98; 1.22
Gaviria, et al 2011	Medellín	Ecológico de Series de Tiempo	PM <sub>10</sub> .	Consulta por Asma	Coefficiente de correlación: 0.6312	N/A
				Consulta por Bronquitis:	Coefficiente de correlación: 0.6002	
				Consulta por Infecciones respiratorias	Coefficiente de correlación: 0.7111	
				Consulta por Rinitis	Coefficiente de correlación 0.7562	
				Consulta por total de enfermedades respiratorias	Coefficiente de correlación 0.7533	
Herrera Torres, et al 2011	Medellín	Estudios prospectivos	PM <sub>2.5</sub> . Exposiciones entre 39 y 62 µg/m <sup>3</sup> .	Consultas por enfermedades respiratorias	↑ RR de 1.54 Niñas	1.00; 2.37
					↑RR de 1.37 en Niños	0.89; 2.11
Blanco Becerra et al, 2014	Bogotá	Ecológico de Series de Tiempo	PM <sub>10</sub> . Incremento de 10µg/m <sup>3</sup>	Mortalidad diaria por enfermedades respiratorias y cardiovasculares	Incremento en 0.76% para todas las edades para Estrato socioeconómico I	0.27; 1.26
					Incremento 0.58% para Estrato socioeconómico I	0.16; 1.00
Blanco Becerra, et al 2014	Bogotá	Ecológico de Series de Tiempo	PM <sub>10</sub> . Incremento de 10µg/m <sup>3</sup>	Mortalidad el mismo día del incremento; > 64 años	Incremento del 1.05% por causas respiratorias	0.12; 1.98
				Mortalidad diaria 3 días después del incremento; todas las edades	Incremento del 0.71% por todas las causas	0.46; 0.96
					Incremento del 1.43% por causas respiratorias	0.85; 2.00



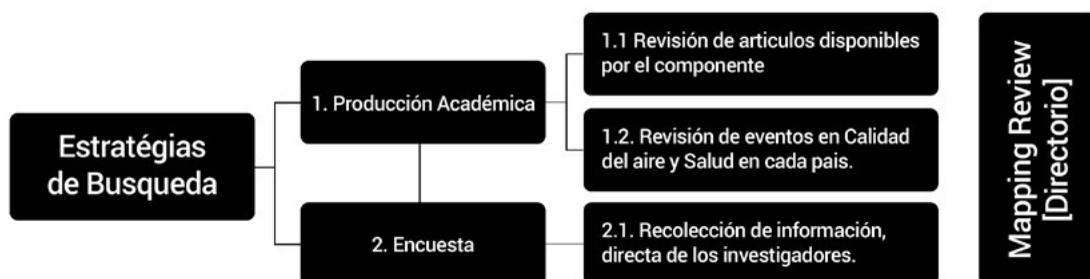
## 1.2 MAPPING REVIEW

Se diseñó una investigación documental tipo *mapping review*, para identificar las instituciones, los grupos y los investigadores que a nivel regional y nacional han abordado el problema de la asociación entre la contaminación atmosférica y la salud durante el periodo de 2008 – 2016. El anexo 3 presenta la metodología y resultados completos de esta parte de la investigación.

### 1.2.1 METODOLOGÍA

Para el mapeo se utilizaron dos estrategias de búsqueda (**Figura 3**): una a partir de textos académicos en el tema, y la otra, mediante un muestreo no probabilístico de bola de nieve donde se aplicó una encuesta prediseñada a algunos de los investigadores encontrados.

**Figura 3.** Esquema metodológico del mapping review



#### Estrategia N°1- Proceso de Búsqueda de investigadores y grupos de investigación a partir de la producción académica

Esta estrategia fue desarrollada en varios momentos, la que se inició con una exploración de la producción académica seleccionada en el componente de revisión de la literatura, que correspondieron a los países de la región y del país. Así mismo se exploraron las memorias de eventos realizados en calidad del aire y salud en algunos países durante el periodo de estudio, entre los que se destacaron principalmente el Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública - CASAP en el año 2013, las Jornadas Multidisciplinarias sobre Movilidad y Contingencia Ambiental y MXI Mxinfraestructure - Contingencia Ambiental y Urgencia de Movilidad Sustentable realizados en México en el año 2016 y el Seminario RespirAR 2011 en Brasil.

La información se organizó en una matriz para establecer las instituciones involucradas y los autores que han realizados investigaciones originales en el tema.



## Estrategia N°2- Encuesta a investigadores

Para la segunda estrategia se aplicó una encuesta prediseñada a varios de los investigadores identificados en la revisión con el fin que, mediante un muestreo de bola de nieve, obtener información sobre otros investigadores claves que no se hubiesen identificado inicialmente. Se aprovechó este contacto con éstos para indagar por las prioridades de investigación en el tema.

La información recolectada se validó con la existente en plataformas virtuales como: 1) los sitios gubernamentales de ciencia, tecnología e innovación de cada país, 2) las páginas de las universidades e institutos de investigación, 3) las bases de datos editoriales de publicaciones indexadas, 4) las redes sociales científicas y profesionales LinkedIn (**Tabla 4**).

Entre estas fuentes de información, cabe resaltar las plataformas de ciencia, tecnología e innovación de los países seleccionados para el mapping review fueron: Colciencias (Colombia), CONICYT (Chile), CONACYT (México), LATTES (Brasil) y FECYT (España). En estas plataformas se encontraba las hojas de vida académicas de los investigadores.

**Tabla 4.** Plataformas de Ciencia, Tecnología e Innovación utilizadas en el mapping review para la validación de datos de investigadores en calidad del aire y salud.

País	Nombre del sistema	Información disponible	URL
Colombia	COLCIENCIAS	Currículum vitae de Latinoamérica y el Caribe – CvLAC	<a href="http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/Login/pre_s_login.do">http://scienti.colciencias.gov.co:8081/cvlac/Login/pre_s_login.do</a>
Chile	CONICYT	Currículum Vitae	<a href="http://spl.conicyt.cl/">http://spl.conicyt.cl/</a>
México	CONACYT	Currículum Vitae Único – CVU	<a href="https://miic.conacyt.mx/generador-view-angular/index.html?application=CVU#/login">https://miic.conacyt.mx/generador-view-angular/index.html?application=CVU#/login</a>
Brasil	LATTES	Currículo	<a href="http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/busca.do?metodo=apresentar">http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/busca.do?metodo=apresentar</a>
España	FECYT	CVN	<a href="https://cvn.fecyt.es/">https://cvn.fecyt.es/</a>

A partir de esta estrategia fueron seleccionados aquellos profesionales que por su trabajo investigativo eran reconocidos por sus pares y se excluyeron aquellos que: 1) No disponían de un perfil profesional e investigativo en plataformas virtuales como: sitios gubernamentales de ciencia, tecnología e innovación de cada país, páginas de las universidades e institutos de investigación, bases de datos editoriales de publicaciones indexadas, y redes sociales científicas y profesionales; 2) aquellos que no tuvieran publicaciones acerca la relación explorada en el periodo de estudio 2008-2016, y 3) quienes no tuvieran más de una publicación en la temática.

## Análisis de la información

Toda la información recolectada a través de las estrategias, se fue compilando en matrices codificadas en Microsoft Excel; en una de ellas se ingresaron los textos para su lectura detallada y la verificación de los criterios de inclusión para las publicaciones; así mismo se diseñó una matriz de autores por país donde se codificaron los investigadores con los datos de contacto, el grupo de investigación y la institución.



Además, se realizó un análisis de datos con Software Estadístico R (The R Project for Statistical Computing) que permitió identificar las prioridades en investigación referidas por los investigadores que participaron de la encuesta y los núdulos de mayor amplitud en la temática, producto del efecto bola de nieve y las publicaciones seleccionadas.

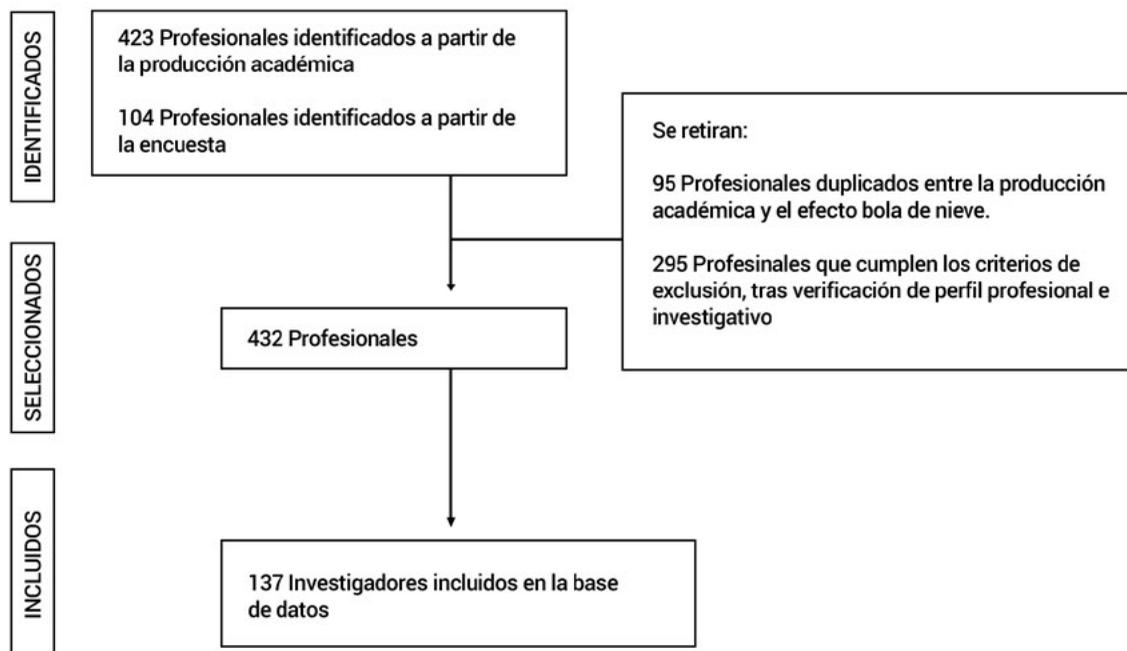
A partir de la información consolidada, se estructuró una base de datos que permitió establecer el contacto de los profesionales y grupos de investigación por país, además de las áreas de experiencia metodológicas, estudios y publicaciones en el periodo estudiado, y la participación en trabajo colaborativo.

## 1.2.2 RESULTADOS DEL MAPPING REVIEW

En total se identificaron 432 investigadores a partir de las estrategias utilizadas, de los cuales solo el 31.7% (137 de 432) habían centrado su ejercicio de investigación de manera significativa en comprender la relación específica entre calidad del aire y salud. Colombia fue el país con mayor número de profesionales incluidos en la base de datos con el 31.9%.

En el siguiente flujograma (**Figura 4**) se indica el proceso de identificación, selección e inclusión de los investigadores en el Mapping Review y el producto (base de datos).

**Figura 4.** Estrategias para la identificación y selección de investigadores en calidad del aire y salud

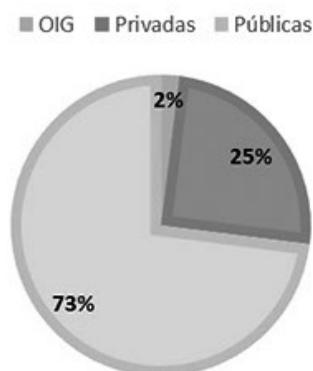


Las 81 instituciones que se incluyeron en la revisión se agruparon en tres subgrupos con el fin de identificar el carácter de estas y su representación en materia de investigación: 1) las instituciones



de carácter público (59 de 81), 2) la naturaleza privada (20 de 81), 3) las organizaciones intergubernamentales -OIG por funcionalidad técnica o específica (2 de 81). La **Figura 5** muestra la distribución de las instituciones por el carácter público o privado de las mismas.

**Figura 5.** Distribución de instituciones que han participado en la investigación de calidad de aire y salud, según su carácter



Una característica homogénea entre los países explorados fue el liderazgo de las universidades en el desarrollo de investigaciones de interés con un 69,2% del total de la muestra (56 de 81).

En el proceso de análisis se identificaron las áreas y disciplinas con mayor participación en estudios interdisciplinarios de contaminación atmosférica y salud, donde se destacaron las afines a las ciencias de la salud, las ciencias sociales, las ciencias naturales / ambientales y las ciencias exactas como las áreas más representativas, como se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Áreas y disciplinas con mayor participación en los estudios de contaminación atmosférica y salud

Áreas	Disciplinas
Disciplinas de las Ciencias de la Salud	Alergología
	Cardiología
	Demografía y planificación regional
	Epidemiología
	Epidemiología Ambiental
	Estadística
	Genética
	Inmunología
	Neurología
	Obstetricia
	Patología
	Pediatría
	Políticas y administración en salud
	Salud Ambiental
	Salud Colectiva
	Salud Ocupacional
	Salud Pública
Toxicología	



Áreas	Disciplinas
Disciplinas en Ciencias Exactas	(Bio) Estadística
	Física
	Matemáticas
	Química
Disciplinas en Ciencias Sociales	Economía
	Políticas Públicas
	Psicología ambiental
Disciplinas en Ciencias Naturales - Ambientales	Biología
	Geológica
	Ingeniería Ambiental
	Ingeniería Civil
	Ingeniería Sanitaria
	Ingeniería Forestal
	Meteorología
Otras disciplinas	Ingeniería de Software

De acuerdo a la participación de los investigadores, instituciones y grupos de investigación en la base de datos del Mapping Review, se presenta una tabla resumen con la distribución geográfica de los mismos y su representatividad en los resultados generales (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Distribución por países de investigadores, grupo e instituciones incluidos en el mapeo

País	Número de investigadores	Número de instituciones	Número de grupos
Colombia	43	23	41
España	20	12	N/A
EEUU	20	15	N/A
Brasil	18	8	10
México	14	10	N/A
Chile	14	4	2
<b>Total países seleccionados</b>	<b>129</b>	<b>73</b>	<b>53</b>
Alemania	1	1	N/A
Australia	1	1	N/A
Canadá	1	1	N/A
Grecia	1	1	N/A
Holanda	1	1	N/A
Italia	1	1	N/A
Suiza	1	1	N/A
Vietnam	1	1	N/A
<b>Total general</b>	<b>137</b>	<b>81</b>	<b>53</b>





Para Colombia se incluyeron en la base de datos 43 investigadores que han estudiado la relación entre contaminación atmosférica y salud, a partir de la revisión de 40 publicaciones, 10 ponencias presentadas en el Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública – CASAP realizado en 2013 en la ciudad de Bogotá y 44 de encuestas resueltas por algunos de los investigadores seleccionados en el mapeo.

Luego de la verificación de los perfiles profesionales de los investigadores que conformaron la base de datos, se logró identificar la participación en 41 grupos de investigación en 23 instituciones, 19 de las cuales pertenecían al sector académico, 3 de estas eran instituciones de orden estatal y una institución prestadora de servicios de salud con misión investigativa. El 56,52% (13 de 23) de las instituciones que investigan el tema, pertenecían al sector público.

**Tabla 7.** Instituciones colombianas que han investigado la asociación contaminación atmosférica y salud en el periodo 2008-2016

N°	Instituciones	N°	Instituciones
1	Departamento Nacional de Planeación	12	Universidad de Los Andes
2	Fundación Neumológica Colombiana	13	Universidad de Manizales
3	Instituto Colombiano de Petróleo	14	Universidad de Medellín
4	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	15	Universidad de Pamplona
5	Secretaría de Salud Bogotá	16	Universidad del Magdalena
6	Universidad CES	17	Universidad del Valle
7	Universidad de Antioquia	18	Universidad EAN
8	Universidad de Boyacá	19	Universidad Industrial de Santander
9	Universidad de Caldas	20	Universidad Nacional de Colombia
10	Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales	21	Universidad Pontificia Bolivariana
11	Universidad de La Salle	22	Universidad Santo Tomás
		23	Universidad Simón Bolívar

Se incluyeron 41 grupos de investigación de diferentes categorías, adscritos a instituciones de orden público y privado del país (**Tabla 8**); se destacó que muchos de estos no tienen continuidad o amplia experiencia en la temática abordada.

Del sector académico, la Universidad de Antioquia sobresalió como la institución con mayor número de grupos que investigan la relación contaminación del aire y salud con 12 grupos, seguida de la Universidad de Los Andes con 5 grupos y la Universidad Nacional de Colombia en sus sedes de Bogotá, Medellín y Manizales, con un total de 5 grupos de investigación.



**Tabla 8.** Grupos de investigación colombianos que han estudiado la asociación contaminación atmosférica y salud, 2008 - 2016

N°	Grupo de investigación	Categoría Colciencias	Institución
1	Grupo de Investigación Fundación Neumológica Colombiana	No aplica	Fundación Neumológica de Colombia
2	Grupo de Investigación en Higiene y Gestión Ambiental - GHYGAM	C	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
3	Grupo de investigación en Epidemiología y Bioestadística	A1	Universidad CES
4	Grupo de Epidemiología	A1	Universidad de Antioquia
5	Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental - GAIA	A1	
6	Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental - GIGA	A1	
7	Grupo de Manejo Eficiente de la Energía - GIMEL	A1	
8	Grupo de Salud y Ambiente	A	
9	Salud y Sociedad	A	
10	Seguridad y Salud en el Trabajo	B	
11	Sistemas de Información en Salud - INFORMED	C	
12	Demografía y Salud	A1	
13	Diagnóstico y control de la Contaminación	A1	
14	Economía de la Salud	Avalado	
15	Grupo de investigación en Psicología Cognitiva	A	
16	Promoción de la Salud y Prevención de la Enfermedad	A	Universidad de Caldas
17	Cuidado de la Salud y Desarrollo Sostenible	B	Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales
18	Grupo de Investigaciones Biomédicas y de Genética Humana Aplicada - GIBGA	C	
19	Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental - CLIMA	A1	Universidad de La Salle





N°	Grupo de investigación	Categoría Colciencias	Institución
20	Centro de Investigación en Ingeniería Ambiental- CIAA	A1	Universidad de Los Andes
21	Grupo de epidemiología de la Universidad de los Andes - EPIANDES	A1	
22	Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional - SUR	Avalado	
23	Grupo de Investigación en Salud Pública, Educación y Profesionalismo- SEP	B	
24	Laboratorio de genética humana	A	
25	Grupo de Investigación Médica	B	Universidad de Manizales
26	Grupo de investigaciones y mediciones ambientales - GEMA	A	Universidad de Medellín
27	Grupo de Investigaciones Ambientales Agua, Aire y Suelo (GIAAS)	C	Universidad De Pamplona
28	Grupo de Investigación en Biocombustibles y Biorrefinerías - GRUBIOC	A	Universidad del Valle
29	Gestión Ambiental	A	Universidad EAN
30	Grupo de Investigación en Demografía, Salud Pública Y Sistemas De Salud - GUINDESS	A1	Universidad Industrial de Santander
31	Calidad del Aire	B	Universidad Nacional de Colombia - Bogotá
32	Epidemiología y Evaluación en Salud Pública	A1	
33	Toxicología Ambiental y Ocupacional - TOXICAO	C	
34	Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental - GTR	A	Universidad Nacional de Colombia - Manizales
35	Laboratorio de la calidad del aire	No aplica	Universidad Nacional de Colombia - Medellín
36	Grupo de Investigación en Ingeniería Sanitaria y Ambiental - GINSA	B	Universidad Pontificia Bolivariana - Bucaramanga
37	Biología de Sistemas	A	Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín
38	Grupo de investigación en Salud Pública	A	
39	Grupo de Investigaciones Ambientales	A1	
40	Ingeniería Ambiental - INAM	C	Universidad Santo Tomás
41	Cuidado de Enfermería	B	Universidad Simón Bolívar



## 1.3 CONCLUSIONES

La revisión realizada sobre la calidad del aire y su impacto en la salud revela su alta prioridad política y académica. Los expertos han reconocido la necesidad e importancia de estimar, de una manera periódica, la calidad del aire urbano en las distintas ciudades y establecer de manera lo más precisa posible su asociación con eventos adversos en salud a corto, mediano y largo plazo, que pueda ser analizada de manera geo-localizada, enfocándose en grupos de alta susceptibilidad y vulnerabilidad (OMS, 2018). La OMS ha ofrecido una serie de directrices apoyadas en los efectos sanitarios que produce la contaminación del aire con base en las estimaciones de los niveles perjudiciales para la salud sustentada en que la mayoría de las fuentes de contaminación del aire exterior están más allá del control de las personas, y requieren medidas por parte de las ciudades, así como de las instancias normativas nacionales e internacionales.

Existe evidencia de muy alta calidad en distintos lugares del mundo que confirman la relación entre la salud y el aire, que reconocen el carácter local del fenómeno y la importancia de desarrollar ejercicios investigativos específicos para su comprensión y como herramienta para la evaluación de las iniciativas de política pública de salud ambiental local (Organización Panamericana de la Salud, 2010). El abordaje técnico de los estudios epidemiológicos revisados permitió determinar las tendencias de investigación en el tema, los diseños investigativos más utilizados, las poblaciones objeto de priorización de las observaciones, las características de la exposición (nivel, tiempo y tipo de contaminante), y los efectos de salud de mayor importancia (morbilidad, mortalidad y atención en los servicios por eventos de tipo respiratorio y cardiovascular). Este último aspecto de gran utilidad para definir eventos centinela en salud asociados a la calidad del aire a nivel local.

Como aspecto fundamental, se logró evidenciar que en las investigaciones epidemiológicas sobre la salud y la calidad del aire es necesario diferenciar claramente el tiempo de exposición a los contaminantes (corta o larga duración), como un elemento esencial para establecer el diseño y las estrategias de investigación, definir los eventos centinela a observar, y planificar los recursos necesarios de tipo técnico, humano y económico.

La exploración permitió establecer que, desde el enfoque ambiental, se han destacado procesos significativos en monitoreo y vigilancia de la calidad del aire, modelación y predicciones atmosféricas, estudios de fuentes de emisiones, combustión de fósiles y biomasa. Mientras en el área de ciencias médicas y de la salud, se han estudiado las relaciones del fenómeno ambiental con la salud respiratoria y cardiovascular de poblaciones expuestas con resultados plausibles y significativos. Así mismo se ha avanzado en estudios que dan cuenta del impacto a nivel genético, como un proxy de enfermedades crónicas (cáncer), y sobre procesos cognitivos y del comportamiento de la población infantil.

Para el caso de Colombia, si bien la evidencia científica aún es limitada, se reconoce la existencia de estudios importantes que deben ser complementados y profundizados. No se encontró evidencia de estudios que aborden las exposiciones de largo plazo que den cuenta de eventos crónicos, ni que caractericen químicamente el material particulado, o exploren exposiciones a nivel individual o con aproximación a lo individual- brechas en el conocimiento que deben cerrarse sobre todo en las ciudades con alta presión ambiental-; así, la investigación aplicada en el país, hasta el momento, ha sido exploratoria en el sentido de las temáticas estudiadas, de los diseños metodológicos, de la medición de los contaminantes, además de tener algunas limitaciones de tipo técnico y administrativo, como la integración de fuentes de información ambientales y de salud, en contraste con los diseños aplicados en países como Brasil, España y Estados Unidos, donde existe acceso amplio a los datos generados por los entes locales, para su uso y la toma de decisiones.



La metodología Mapping Review, tuvo por objeto identificar investigadores, grupos y redes de investigación que han estudiado la relación entre salud y contaminación del aire en los países de la región, pero principalmente en Colombia. Con este ejercicio se pudo apreciar que las discusiones en el tema han cobrado gran importancia en diferentes escenarios liderados principalmente por el sector político, la comunidad académica y social, en virtud del reconocimiento de los impactos que genera para la salud pública y el medio ambiente en general.

A lo largo del periodo de 2008-2016 e incluso desde antes, algunos grupos de investigación e investigadores, principalmente en el ámbito local, desarrollaron estudios en la temática, pero pocos presentaron continuidad en la realización de estas, contrario al tema contaminación atmosférica, donde se identificaron un gran volumen de investigaciones y expertos, que no necesariamente contaban con el componente de salud pública. La no continuidad y la poca articulación de grupos interdisciplinarios explica la brecha en el conocimiento existente a nivel local y la escasa gestión social del conocimiento generado.

Se destaca el liderazgo del sector académico en la investigación sobre la calidad del aire y la salud, lo que da cuenta del papel primordial que juegan estas entidades, ya sean de carácter público o privado, en la generación de nuevo conocimiento científico, bien sea por interés de sus líneas de estudio o como producto de convenios interinstitucionales.





## CAPÍTULO 2

# ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ Y MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La gestión del recurso aire por parte del AMVA se apoya en la red de monitoreo de la calidad del aire operada por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá- SIATA y aunque su lógica se ha centrado en el monitoreo ambiental, la información que genera puede contribuir a la comprensión de las dinámicas en el territorio en materia de calidad del aire, especialmente cuando esta se relaciona con las técnicas epidemiológicas, en particular con aquellas que refieren la situación de salud de las poblaciones.

En este capítulo se describe el componente ambiental del proyecto como insumo para comprender la relación entre los contaminantes del aire y eventos centinela de salud. La primera consiste en el análisis de tendencia de los tres contaminantes criterio ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ ) basados en la información histórica recopilada por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá entre 2008 y 2016 de los diez municipios de la región. La segunda estrategia permitió estimar el impacto de las fuentes de contaminantes sobre los niveles de calidad del aire, para lo cual se utilizó el modelo de dispersión AERMOD, que predice y representa la contaminación el impacto de las fuentes de contaminación en la calidad del aire en áreas pequeñas (de 10 a 1  $km^2$ ), en el caso específico de la contaminación en el Valle de Aburrá el modelo podría ser útil cuando se estudia la asociación los efectos existentes entre contaminación y salud a una escala geográfica de comuna o barrio. Estos análisis se detallan en los anexos 4 y 5.



## 2.1 OBJETIVO

Caracterizar el comportamiento de la calidad del aire según variables de lugar y tiempo en el AMVA.

## 2.2 ANÁLISIS DE LA TENDENCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ

### 2.2.1 COMPONENTE METODOLÓGICO

Los procedimientos que se realizaron para alcanzar este objetivo fueron: inventario de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire, análisis exploratorio de las series-datos atípicos y faltantes, combinación de series de tiempo, análisis de las series ensambladas y descripción de las excedencias a las normas de contaminantes atmosféricos. A continuación, se describen brevemente cada uno de los procedimientos, cuya ampliación se encuentra en el anexo 4.

#### Inventario de las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Para el análisis de información relacionada con la calidad del aire, se obtuvo el inventario de estaciones automáticas y semiautomáticas de la red de monitoreo del Valle de Aburrá, la cual se encuentra distribuida entre los diez municipios que conforman el AMVA, que son, Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas; esta red registra información promedio de los contaminantes cada hora y cada 72 horas respectivamente. Los contaminantes objeto del estudio fueron  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ , optándose por la información que contenía el registro diario de los contaminantes, en el período comprendido entre el 1 de enero de 2008 y 31 de diciembre de 2016. En total, 37 estaciones fijas estuvieron en funcionamiento durante el periodo de tiempo.

#### Análisis exploratorio de las series

El análisis exploratorio comprendió el conjunto de procedimientos estadísticos e informáticos que se realizaron a los registros de los contaminantes; además fue útil porque permitió comprender la estructura de los datos, describir el patrón de comportamiento general y específico de los mismos, detectar datos erróneos o inesperados, como también orientar las decisiones analíticas posteriores en las diferentes etapas de los análisis para obtener conclusiones válidas.

Al conjunto de datos de los contaminantes y otros datos ambientales que se encontraban recopilados secuencialmente en intervalos de tiempo regulares, bien fuera por día o por semana o en cualquier otra unidad de tiempo, fueron las series de tiempo objeto de estudio; en efecto, el análisis que sustenta este capítulo se basó en las concentraciones promedio diarias de los contaminantes criterio:  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  en  $\mu g/m^3$ .

Para todas las series de contaminantes del estudio, se realizó un análisis exploratorio con el fin de verificar la pertinencia de los datos, es decir, para confirmar si estos se encontraban en los rangos plausibles desde el punto de vista físico y biológico, y si existían valores atípicos y/o faltantes para





cada variable considerada. Así mismo, se aplicaron a las series de tiempo de los contaminantes procedimientos descriptivos que permitieron organizar, sintetizar y detectar las características más relevantes, lo que exigió el cálculo de las medidas de resumen clásicas tales como la media, la mediana la desviación estándar, entre otras.

A partir de esta exploración, se evidenció que la mayoría de las estaciones no disponían de datos de medición para todos los contaminantes durante el periodo tiempo del año 2008 al año 2016; sin embargo, para realizar los análisis que permitieran dilucidar la asociación entre los datos de contaminación atmosférica y salud era necesaria la continuidad de las series para todo el periodo de funcionamiento de la estación de medición, por tanto, fue necesario recurrir a técnicas como la imputación de datos.

## Imputación de valores no disponibles

La imputación es un proceso que utiliza técnicas estadísticas para completar los datos faltantes (no encontrados, nulos, no disponibles). La información correspondiente a las series de contaminantes en la red de monitoreo de calidad del aire del AMVA, se encontraba limitada por la presencia de valores faltantes que varió entre el 1.5% y el 73,5%; se procedió realizar la imputación de los valores no disponibles de los contaminantes por día.

Cabe anotar que el porcentaje de valores faltantes se utilizó como criterio para determinar el método de imputación a aplicar (**Tabla 9**), en conjunto con el periodo de medición, las gráficas de valores perdidos y las variables meteorológicas medidas en la estación asociada a la serie de interés.

**Tabla 9.** Métodos propuestos para la imputación de los valores no disponibles en las series de contaminantes

Metodología de imputación para valores no disponibles	Condiciones de la serie para realización de la imputación
Imputación múltiple	Porcentaje de valores perdidos menor al 25%
	Periodo de medición menor a 4 años (series diarias)
	Presencia de otras variables medidas en la misma estación (concentraciones de contaminantes y/o variables meteorológicas)
Análisis de series de tiempo univariadas – ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)	No existían otras variables medidas en la misma estación
	Existencia de limitaciones con la imputación múltiple
Metodología propuesta por Plaia & Blondí (2006)	No existían otras variables medidas en la misma estación
	Existencia de limitaciones con la imputación por el método ARIMA
Técnicas heurísticas (redes neuronales)	Existencia de series con valores perdidos superiores al 25%
	Existencia de series con grandes variaciones respecto a la media, por ejemplo, con O <sub>3</sub>



## Combinación de series de tiempo<sup>1</sup>

Una vez imputadas las series, y dado que en algunos municipios había réplicas en las mediciones de los contaminantes, se optó por establecer una serie única de cada municipio, con el fin de aprovechar la información disponible de cada serie por contaminante.

Una de las técnicas utilizadas para realizar la combinación de series de tiempo, son los modelos no lineales de efectos mixtos también conocidos como modelos jerárquicos no lineales. Estos permiten combinar efectos de diferentes conjuntos de datos y son ampliamente aceptados en el contexto internacional. Estos modelos permiten realizar la combinación no lineal de los conjuntos de datos disponibles, para así obtener los que mejor explican a los fenómenos en cuestión. Fitzmaurice, 2009.

El proceso de ensamblaje de las series requirió del cálculo de la entropía en éstas. La entropía mide la incertidumbre de una fuente de información, es decir, permite valorar si la información disponible de un fenómeno puede aportar para reducir o eliminar la incertidumbre sobre su comprensión (Van Drie, 2008). El análisis de la entropía en el estudio se asimiló a la interpretación de un coeficiente de correlación (Van Drie, 2008) y consistió en medir ésta en general, es decir no únicamente de manera lineal, entre las series de tiempo continuas permitiendo caracterizar la información producto de procesos no-lineales y determinar la cercanía relativa entre los conjuntos de datos.

## Análisis de las series ensambladas

Después de ensamblar las series, se realizó un análisis exploratorio de las series representativas de cada municipio por medio de los promedios anuales, mensuales y por día de la semana para valorar la estacionalidad de las mismas para cada contaminante en cada municipio. Este análisis incluyó:

### Excedencias a las normas de calidad del aire

*“Una excedencia se define como el evento en el cual los valores de concentración de un contaminante sobrepasan lo estipulado en la norma de calidad del aire” (Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial., 2010. Para el cálculo de las excedencias, se tomaron como referencia los niveles máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Organización Mundial de la Salud (Tabla 10). Con base en estos valores de referencia, se calculó el número de días de excedencias y de no excedencias de las series de contaminantes y se graficaron los porcentajes de excedencias para cada año.*

---

<sup>1</sup> Esta metodología fue presentada en el Reunión Anual de la Sociedad Internacional de Ciencias de la Exposición y la Sociedad Internacional de Epidemiología Ambiental (ISES-ISEE 2018), que se realizó en Ottawa (Canadá) entre el 26 y el 30 de agosto de 2018 con una ponencia oral titulada: Artificial Neural Networks to Mix Datasets from Particulate Matters and O<sub>3</sub> In Medellín, Colombia; la cual fue galardonada como el mejor abstract de ciencias de la exposición.





**Tabla 10.** Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, Resolución 610 de 2010 y Guías de Calidad del Aire de la OMS

Contaminante	Colombia LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )*	OMS LMP ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Tiempo de exposición
PM <sub>10</sub>	50	20	Anual
	100	50	24 horas
PM <sub>2.5</sub>	25	10	Anual
	50	25	24 horas
O <sub>3</sub>	80	100	8 horas

\* LMP: Limite máximo permisible

Fuente: (Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial., 2010; OMS, 2005)

## Análisis de series de tiempo

Posterior a los ajustes necesarios, se realizaron los siguientes análisis: análisis clásico de las series de tiempo con el fin de identificar sus componentes respectivos a saber, la tendencia general, la estacionalidad y la ciclicidad (Guicherit & Roemer, 2000). Para la estimación de la tendencia se hizo uso de las pruebas estadísticas de Mann-Kendall para todo el periodo de tiempo y para cada año con el fin de ajustarla a modelos matemáticos tales como el lineal, cuadrático, cúbico y logarítmico, entre otros (Enders, 2008). En el análisis de la estacionalidad, se consideró la información diaria con la cual se identificaron patrones de cambio, regularmente recurrentes a través del tiempo. La ciclicidad no se abordó por incumplimiento de los postulados teóricos que avalan su uso (Nelson & Plosser, 1982; Valencia, Lozano, & Moreno, 2007).

## 2.2.2 RESULTADOS

### Imputación de las series

Para aplicar el método de imputación múltiple es necesaria la existencia de variables explicativas asociadas a la serie evaluada, siendo en este caso, las meteorológicas: temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (%), precipitación (mm) y radiación solar ( $\text{Wm}^{-2}$ ). Entre las 55 series de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> que se imputaron, en 13 se aplicó la técnica de la imputación múltiple dado que se tuvieron las variables explicativas que permitieron su uso, con excepción de la serie de PM<sub>2.5</sub> de la estación CAL-LASA la cual no tenía variables explicativas por lo que se recurrió a los modelos ARIMA.

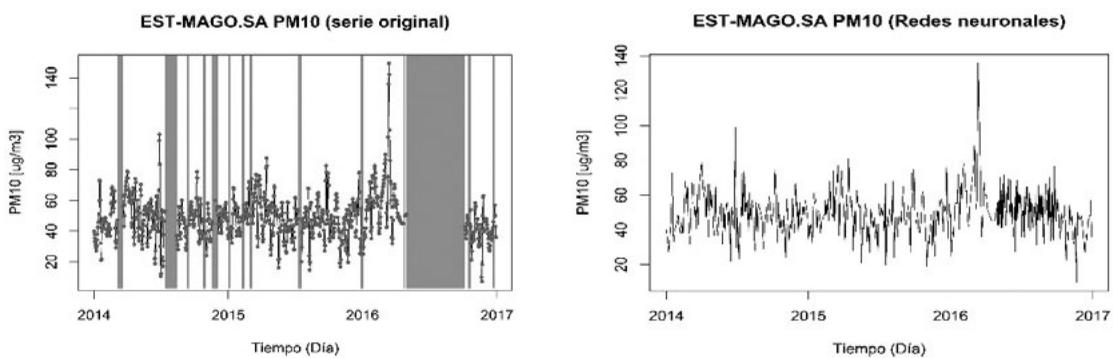
2 \*Unidad de medida para radiación solar: Vatio por metro cúbico cuadrado



Se siguió también, el procedimiento planteado por Plaia & Blondi (2006) para la imputación de 12 series univariadas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , es decir, para las estaciones que sólo registraban la medición de una variable ambiental. Finalmente, se imputaron 103 series por el método de redes neuronales, donde para cada serie y sub conjunto de datos observados (conocidos) se realizaron 1.000 simulaciones y se tomó la de menor error cuadrático medio, obtenido mediante validación cruzada. Así, si una serie tenía un total de 4 subconjuntos de datos, se realizaban aproximadamente 4.000 simulaciones hacia adelante y mil hacia atrás para estimar los datos faltantes (**Figura 6**).

En general, las metodologías implementadas presentaron un buen ajuste tanto al comparar gráficamente las series originales con las imputadas como al analizar los estadísticos descriptivos asociados a las mismas. Por ende, fue prudente utilizar las series para los análisis relacionados a la asociación entre la salud y la contaminación atmosférica, dado que ignorar los valores perdidos implicaba un gran riesgo de introducir sesgos en los resultados.

**Figura 6.** Serie de  $PM_{10}$  registrada en la estación EST-MAGO



a) serie original

b) serie imputada por redes neuronales

## Series ensambladas

A partir de los resultados obtenidos con la aplicación de la técnica de la entropía de las series de tiempo, se encontró correlación significativa entre las mismas. Para el caso de Medellín, las series de tiempo de  $PM_{10}$  se correlacionaron entre sí, lo cual evidenció que no es indiferente tomar una u otra para representar el fenómeno y que por lo tanto todas las series aportan información valiosa, aunque no suficiente del fenómeno bajo análisis. Lo expresado anteriormente, aplicó para los demás contaminantes en cada uno de los municipios.

Dada la información disponible, fue aplicada la metodología de ensamblaje para las series de  $PM_{10}$  de los municipios de Caldas, Itagüí, La Estrella y Medellín; y de  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  para los municipios de Itagüí y Medellín (**Tabla 11**) con el fin de construir una serie representativa del comportamiento de cada contaminante por municipio.

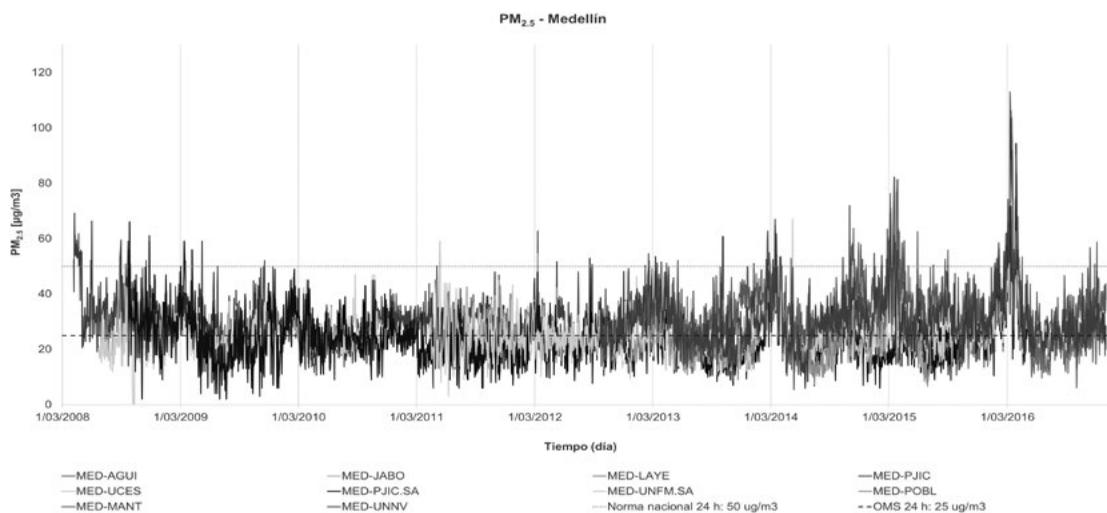


**Tabla 11.** Listado de series utilizadas para la construcción de las series ensambladas

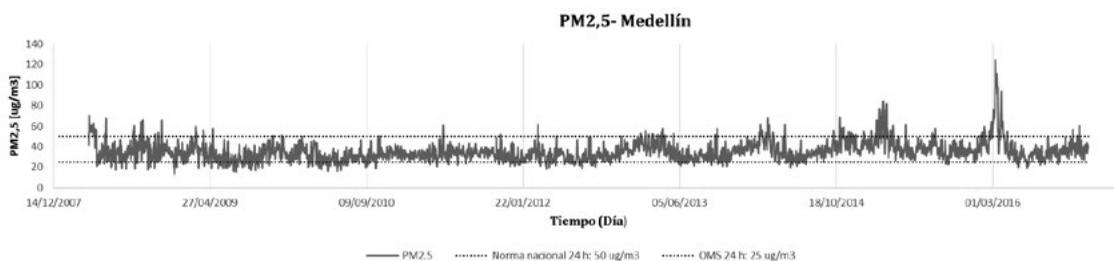
Municipio	Contaminante	Número de series utilizadas
Caldas	PM <sub>10</sub>	2
Itagüí	PM <sub>10</sub>	6
	PM <sub>2,5</sub>	3
	O <sub>3</sub>	3
La Estrella	PM <sub>10</sub>	2
Medellín	PM <sub>10</sub>	12
	PM <sub>2,5</sub>	10
	O <sub>3</sub>	9

Las series obtenidas, a pesar de estar ensambladas en una única serie, conservaron los “picos” de contaminación (**Figura 7 y Figura 8**), es decir, continuaban mostrando los momentos donde se incrementaban los niveles de concentración de los contaminantes respecto al comportamiento que venían presentando en la serie de tiempo. Estos picos son de gran importancia desde el punto de vista ambiental y epidemiológico.

**Figura 7.** Serie de tiempo de concentraciones de PM<sub>2,5</sub> de las estaciones de monitoreo de Medellín entre 2008 y 2016.



**Figura 8.** Serie de tiempo combinada de PM<sub>2,5</sub> en Medellín entre 2008 y 2016.





## Excedencias a las normas de calidad del aire

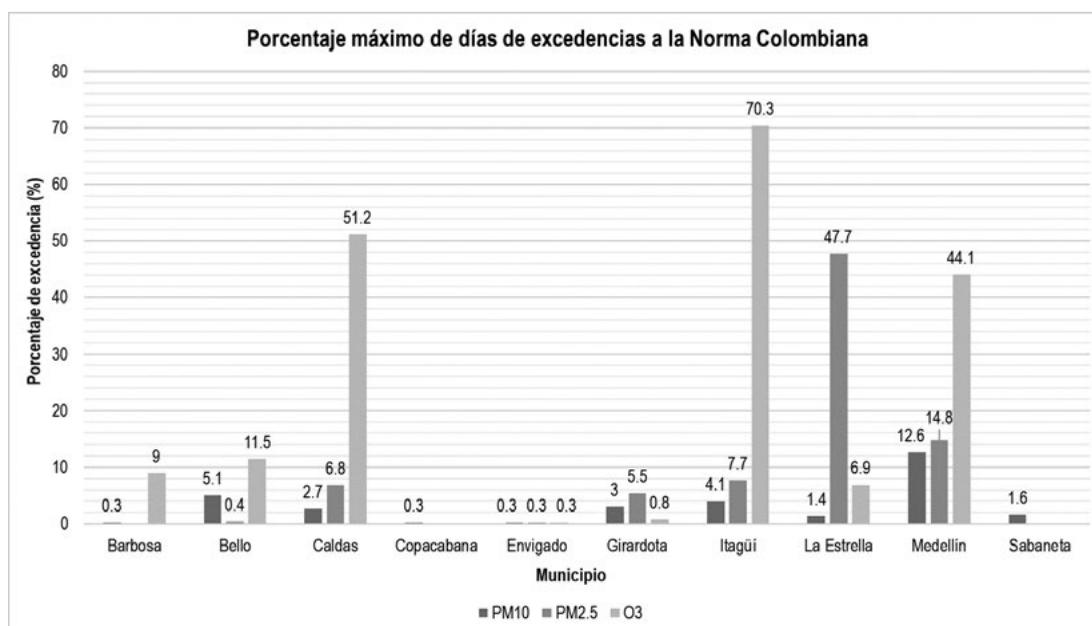
El cálculo de las excedencias se realizó categorizando las series de tal forma que 0 se asignó a todos los valores menores al valor del umbral diario (octohorario para O<sub>3</sub>) de la norma, y 1 para los valores por encima de éste, de esta manera, el valor asignado corresponde a un día de excedencia. Luego, se procedió a sumar para cada año, los nuevos valores de la serie (0 y 1) con el fin de calcular el número de días de excedencias y de no excedencias. Finalmente, se calcularon y graficaron los porcentajes de excedencias para cada año, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Porcentaje de excedencias diarias} = \frac{(\text{Días de excedencias} * 100\%)}{(\text{Días de excedencias} + \text{Días de no excedencias})}$$

Para todos los contaminantes se presentaron excedencias a la norma establecida en las Guías de la OMS (OMS, 2005), debido a que éstas son más restrictivas, exceptuando el límite para O<sub>3</sub>; sin embargo, al evaluar los umbrales de la normativa colombiana de calidad del aire (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. República de Colombia, 2010), no siempre se presentaban incumplimientos de la misma. Para la mayoría de los municipios, se presentó el mayor número de excedencias a las Guías de la OMS para PM<sub>10</sub> en el año 2009, con un nuevo incremento en el año 2016; mientras que para PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>, en el año 2016 se presentaron las máximas excedencias.

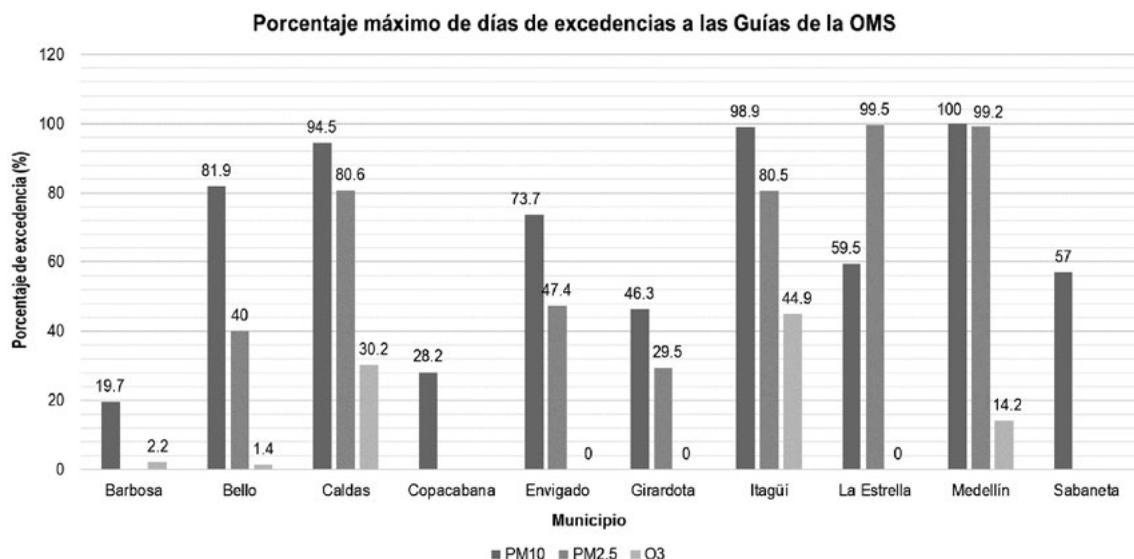
Entre los municipios que componen el AMVA, Medellín presentó el mayor número de excedencias a ambas normas para PM<sub>10</sub>, La Estrella para PM<sub>2.5</sub> e Itagüí para O<sub>3</sub> (**Figura 9 y Figura 10**). En general, los municipios ubicados al sur del Valle de Aburrá presentaron mayores días de excedencias, por el contrario, los municipios ubicados al norte del Valle presentaron un número menor de días con valores por encima del umbral establecido, esto puede estar relacionado con la presencia de industrias en los municipios, además de los patrones de viento, los cuales presentaban una dirección norte-sur.

**Figura 9.** Porcentaje de días de excedencias máximo a la norma colombiana para cada contaminante, por municipio





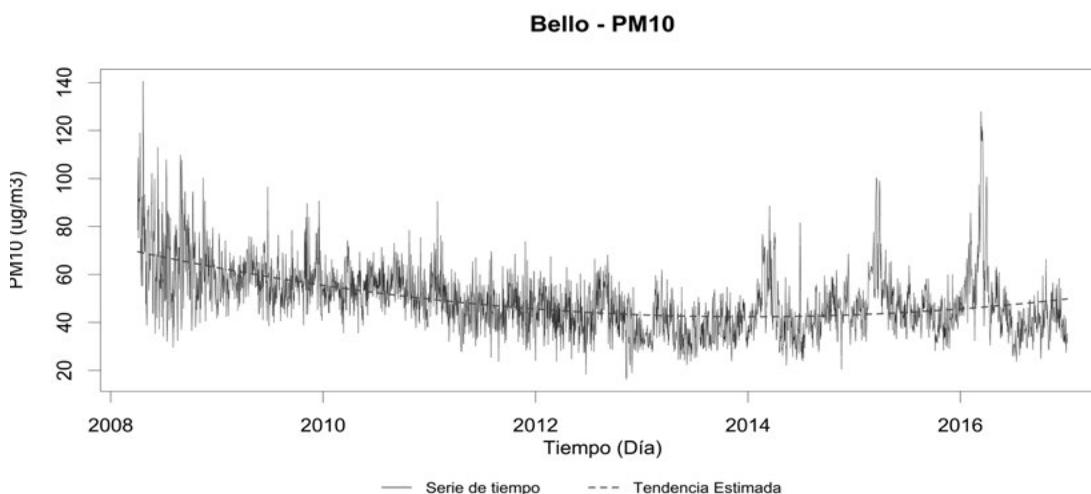
**Figura 10.** Porcentaje de días de excedencias máximo a las Guías de la OMS para cada contaminante, por municipio



### Análisis de series de tiempo de PM<sub>10</sub>

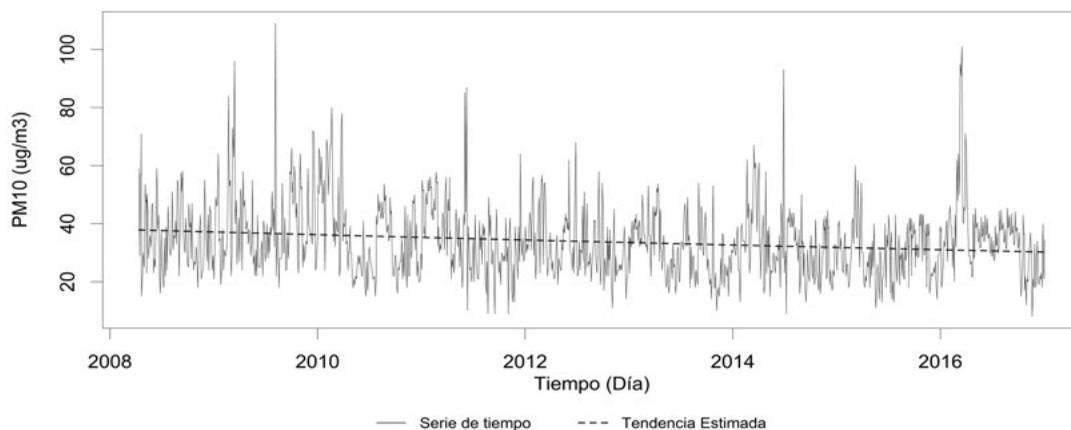
Para PM<sub>10</sub>, entre los modelos lineales de tendencia analizados, no se ajustó ningún modelo para Girardota, sin embargo, la prueba estadística arrojó la existencia de una tendencia monótonica positiva, es decir, los niveles de los contaminantes tenían una tendencia a aumentar con el tiempo. Para los demás municipios, exceptuando Sabaneta, las series de PM<sub>10</sub> presentaron una tendencia a la disminución en todo el periodo comprendido entre los años 2008 y 2016, y la mayor concentración promedio anual la mostraron en 2008-2009, posiblemente relacionados con la presencia y transición de ENSO- Oscilación del Sur- frío ( fenómeno de La Niña) a cálido (fenómeno del Niño), respectivamente (Aristizábal, 2010; Climate prediction center, 2018) (Figura 11).

**Figura 11.** Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de PM<sub>10</sub> de los municipios del Valle de Aburrá

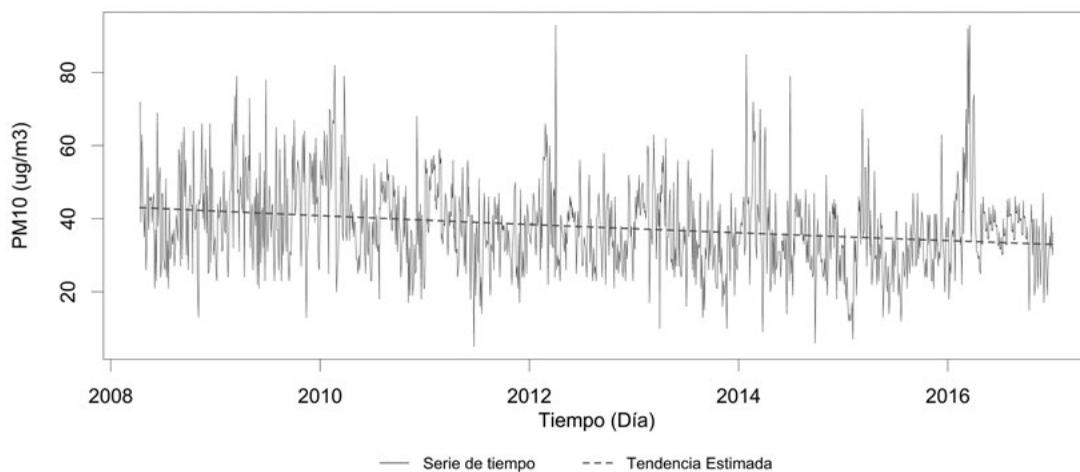




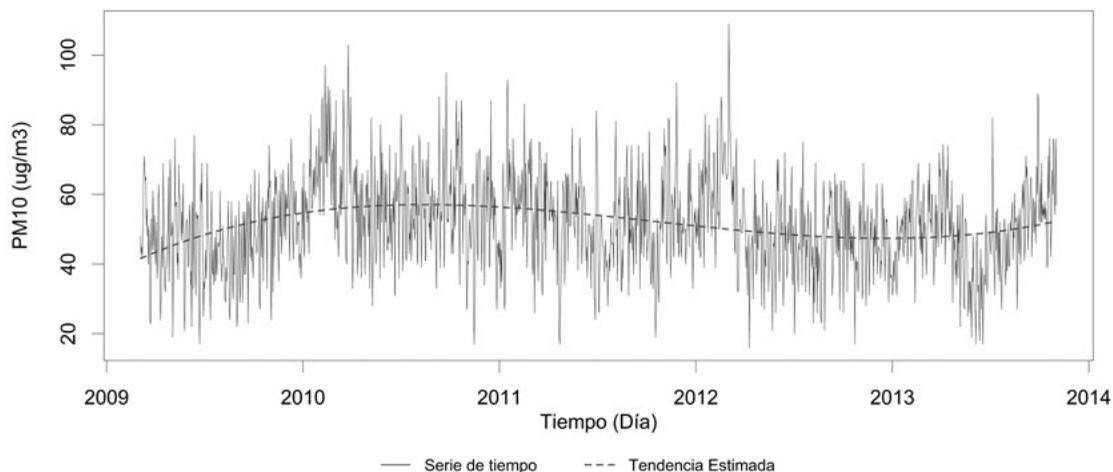
### Barbosa - PM10



### Copacabana - PM10

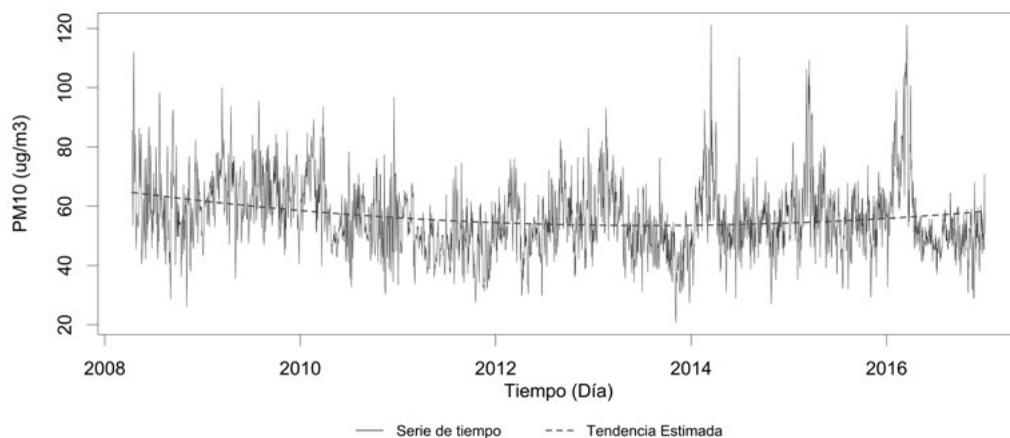


### Envigado - PM10

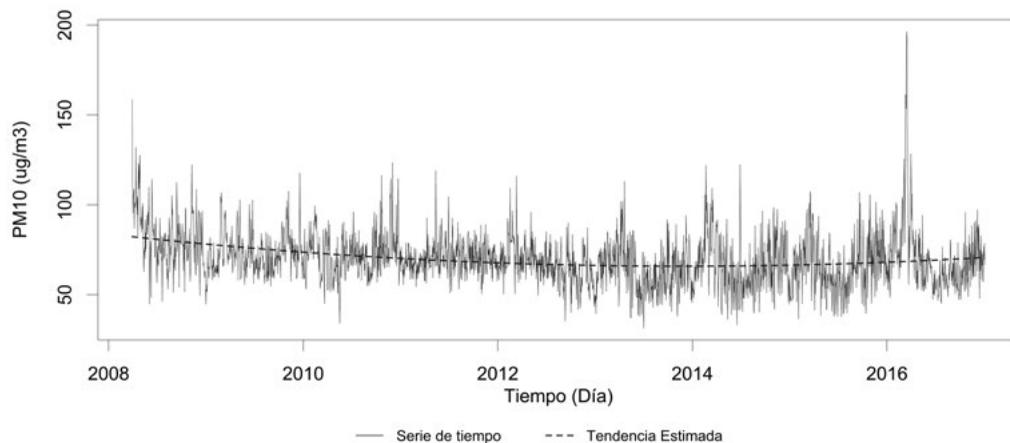




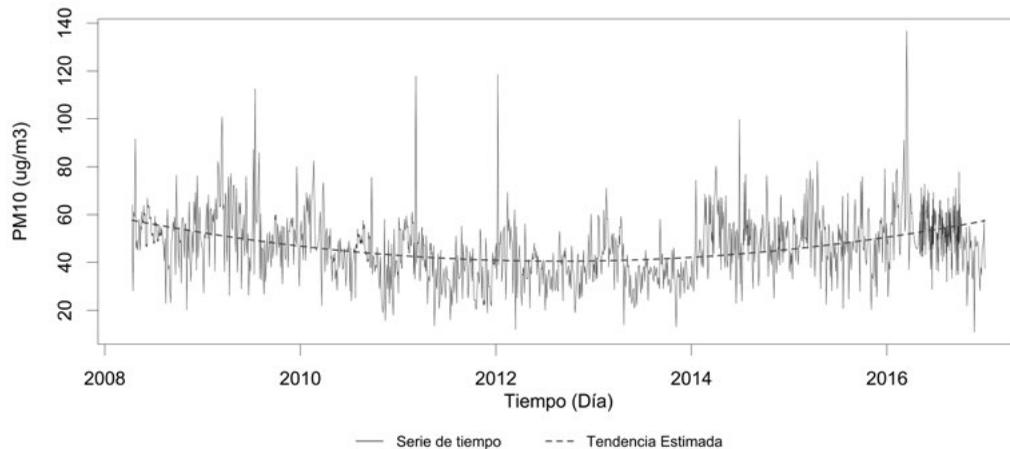
### Caldas - PM10



### Medellin - PM10

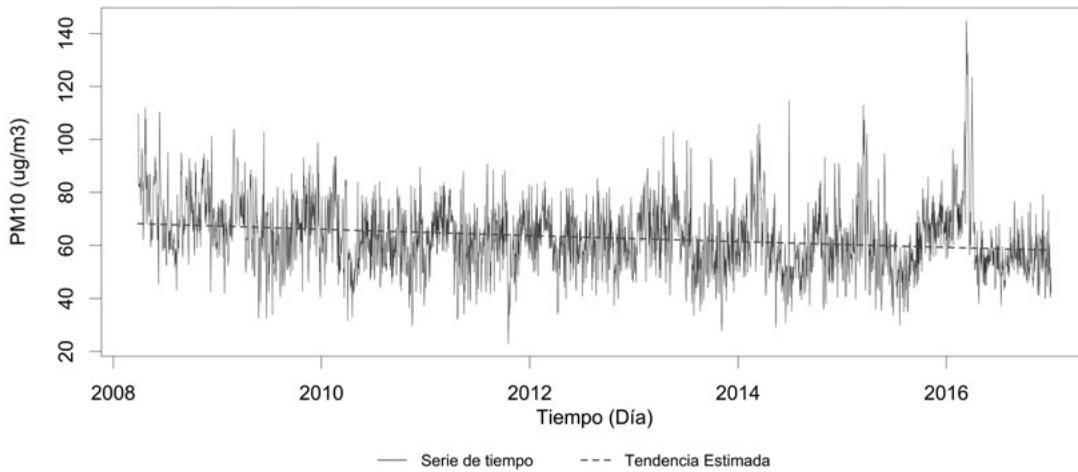


### La Estrella - PM10

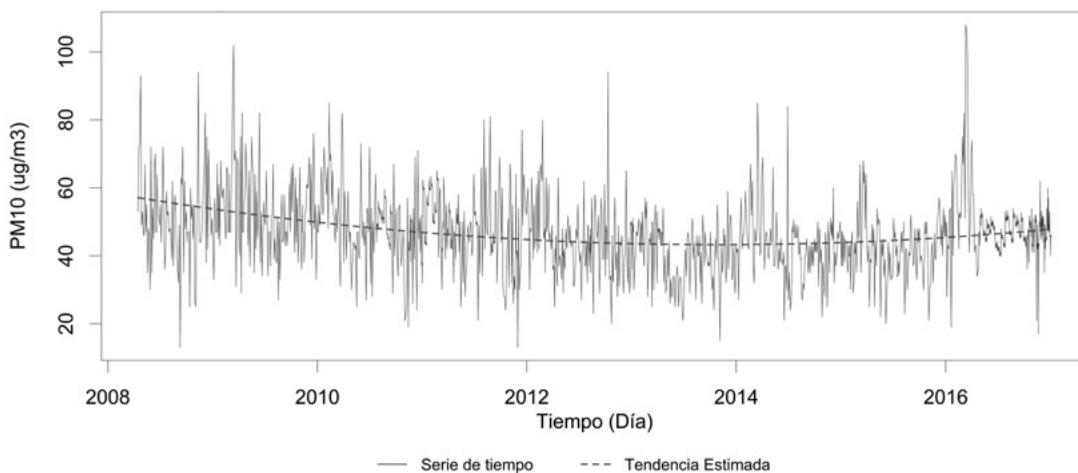




### Itagui - PM10



### Sabaneta - PM10



## Análisis de series de tiempo de PM<sub>2.5</sub>

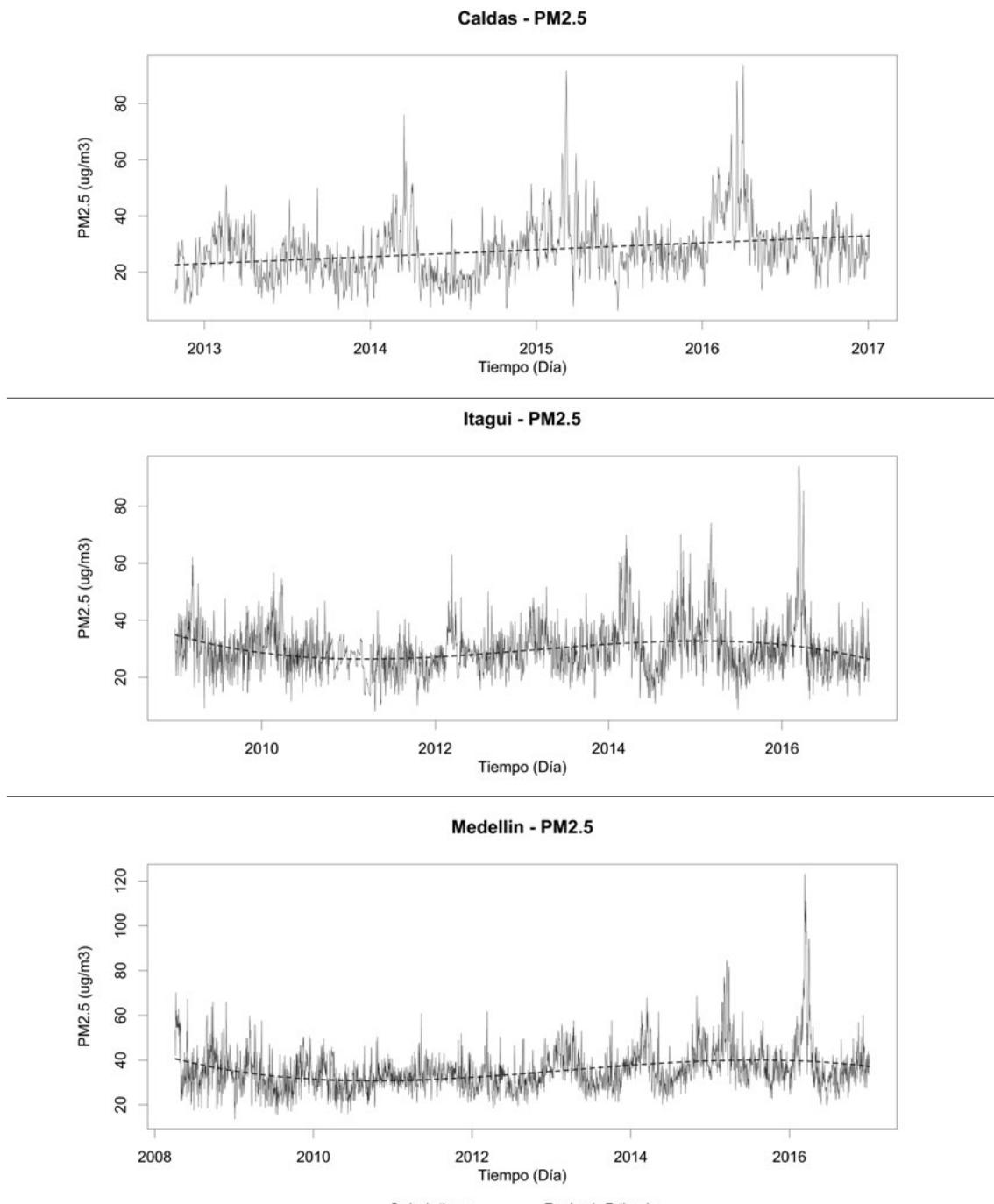
Entre los modelos matemáticos valorados, sólo fue posible representar con un modelo lineal y dos cúbicos, las tendencias de los municipios de Caldas, Medellín e Itagüí, respectivamente, a pesar que, para este último, no se encontró una tendencia significativa, a un nivel de significación del 5%, mediante la prueba Mann-Kendall. Para la mayoría de los municipios<sup>3</sup> se encontró la existencia de tendencias monotónicas en las series de PM<sub>2.5</sub>, excepto para Envigado e Itagüí, donde éstas fueron crecientes en todo el periodo comprendido entre los años 2008 y 2016, menos en Girardota, donde los datos presentaron una tendencia a la disminución (**Figura 12**).

3 En el periodo evaluado no funcionaron equipos de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> en los municipios de Barbosa, Copacabana y Sabaneta.





**Figura 12.** Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de  $PM_{2.5}$  de los municipios Caldas, Itagüí y Medellín



Los niveles de  $PM_{2.5}$  se incrementaron desde el año 2014, probablemente debido a la ocurrencia de eventos de alerta en los meses marzo y abril, asociados al régimen bimodal de lluvias en Colombia, con dos épocas lluviosas en los meses marzo-abril-mayo y septiembre-octubre-noviembre (Molano & Batista, 1997). Durante los meses con altas precipitaciones se incrementan las condiciones que favorecen una atmósfera estable en el Valle de Aburrá, lo que limita la dispersión de contaminantes en la atmósfera, y como consecuencia, se incrementan las concentraciones de los mismos (Wallace & Hobbs, 2006).

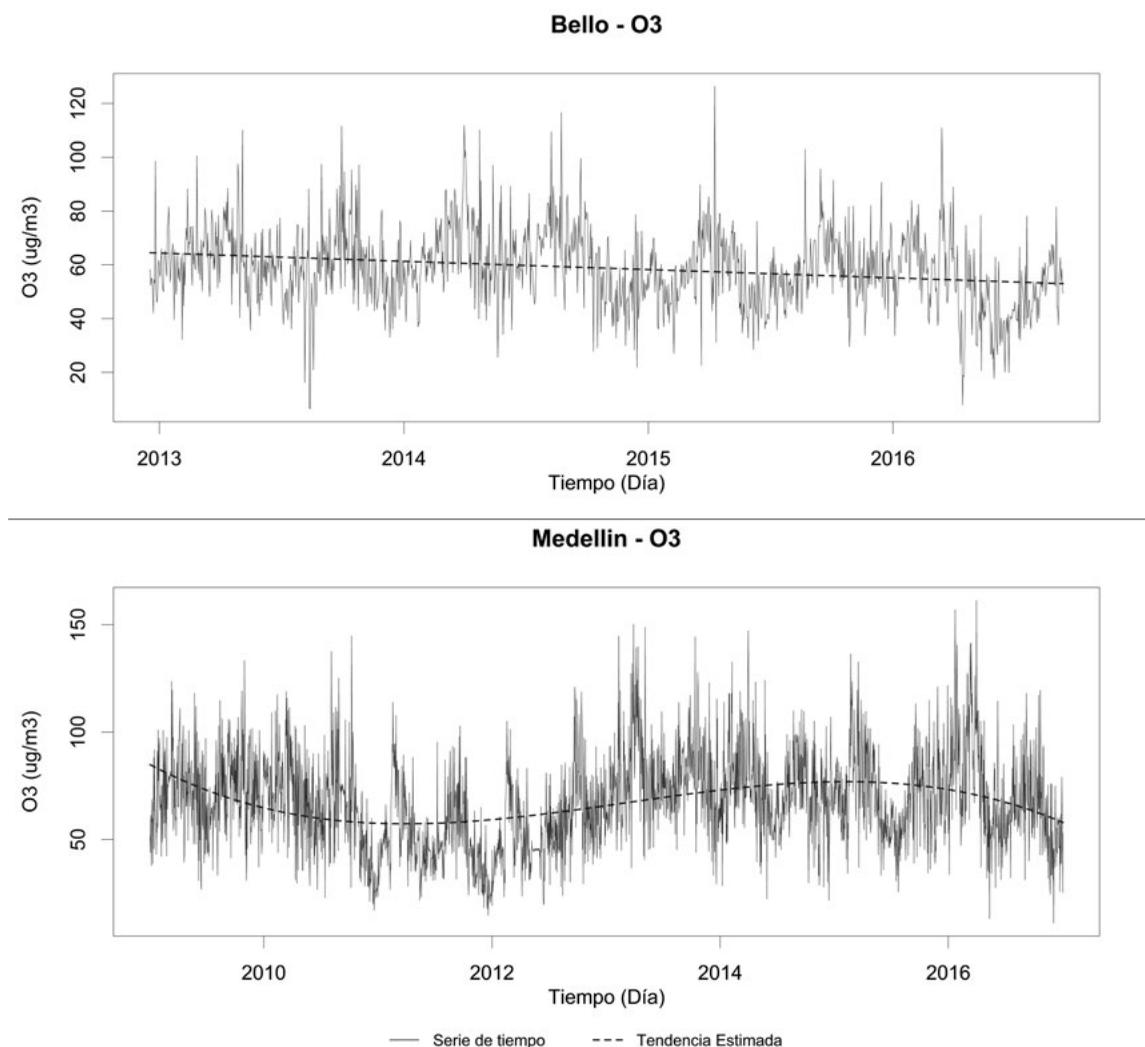


## Análisis de series de tiempo de O<sub>3</sub>

Entre los modelos matemáticos evaluados, sólo fue posible representar con un modelo lineal y uno cúbico, las tendencias de los municipios de Bello y Medellín (**Figura 13**). Las tendencias fueron decrecientes para los municipios de Bello, Girardota y La Estrella, y creciente para el resto. Se presentaron "picos" principalmente en el año 2013, además, al evaluar la estacionalidad de la serie se encontraron aumentos bimodales en las concentraciones promedio mensuales de las series en los meses marzo-abril y septiembre-octubre.

Se deduce que dichos eventos podrían estar relacionados a la estacionalidad de las lluvias en Colombia, sin embargo, al ser el ozono un contaminante fotoquímico, es decir que depende de la radiación solar incidente para formarse en el aire, la cual, en esta época del año, disminuye debido a la alta nubosidad, los "picos" estacionales de este contaminante pueden ser producto de una fuente antropogénica (producida por actividad humana) que emite directamente el ozono, o por altas concentraciones en hidrocarburos y dióxidos de nitrógeno, los cuales son precursores de éste contaminante (Guicherit & Roemer, 2000; Saini, Taneja, & Singh, 2017; Zhao & Wang, 2017).

**Figura 13.** Modelos de tendencias ajustados para las series diarias de O<sub>3</sub> de los municipios del Valle de Aburrá





## 2.3 MODELO DE DISPERSIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

### 2.3.1 COMPONENTE METODOLÓGICO

#### Descripción del modelo de dispersión

La intención fue la modelación de pequeña área como una herramienta para los estudios epidemiológicos. Se evaluaron los impactos producidos por actividades generadoras de emisiones ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $O_3$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , SO) en el Valle de Aburrá. Para esto se aplicó el modelo de dispersión AERMOD, que estima los niveles de concentración en diferentes ubicaciones (receptores), y compara estos valores con los niveles medidos o los máximos permisibles por la normatividad.

La distribución de la concentración de los contaminantes en el espacio y en el tiempo es variable y está influenciada por condiciones climáticas, meteorológicas y topográficas locales, las características de las fuentes de emisión, la cantidad de fuentes generadoras, el tipo de combustible utilizado, la eficiencia del sistema de combustión, la altura de las chimeneas, la topografía, la altitud y la estabilidad atmosférica. Todas estas condiciones complejizan la comprensión de la distribución de los contaminantes en el territorio, por lo cual fue necesario utilizar herramientas de modelación estándar que permitieron integrar la información y por lo tanto disminuir la incertidumbre de este fenómeno (Aregui G, 2014).

Se seleccionó el modelo AERMOD, porque permite establecer una predicción de la contaminación en zonas cercanas a las fuentes de emisión y la concentración de los contaminantes en áreas de pequeña dimensión, puesto que fue diseñado para este tipo de escenarios.

#### Fuentes de información

#### Ubicación de las fuentes e inventario de emisiones

Las fuentes que emiten contaminantes se tomaron a partir del inventario de emisiones de tres tipos de fuentes: fuentes fijas, de área y móviles. Este inventario está disponible en la plataforma MODEAM<sup>4</sup>, alimentada y administrada por la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín. Con el fin de identificar la información del inventario de emisiones disponible, se realizó una primera exploración, que permitió obtener los datos almacenados para los tipos de fuentes requeridas (fijas, móviles y de área) en la implementación del modelo. El periodo de tiempo de la consulta se restringió a los años 2015 y 2016, debido a las limitaciones de disponibilidad de datos meteorológicos en periodos previos.

La información se recolectó manualmente desde la plataforma MODEAM, utilizando una rejilla de 60x60 km sobre el Valle de Aburrá, compuesta internamente por 3.600 cuadrículas cada una de 1 km<sup>2</sup>. donde cada una de ellas permitía visualizar la emisión del contaminante en kg/día. Se identificaron un total de 1.389 fuentes fijas, de las cuales 539 emitían  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  y algunas más de un contaminante.

4 Información del modelo disponible en: <http://modemed.upb.edu.co/zipma2/>



Para la consolidación del inventario de emisiones se recolectó información de las celdas que contenían estimación de las emisiones de fuentes móviles y fijas en una hoja de Excel, en la cual, adicionalmente se ingresó la georreferenciación en coordenadas UTM 18N, para ser utilizadas en el modelo AERMOD como fuentes de área.

También se realizó un proceso de discretización de las fuentes de emisión móviles de áreas de 1 km<sup>2</sup> para tres celdas diferentes (1700, 1760 y 2296, nomenclatura tomada del MODEAM para identificar las respectivas celdas), a las cuales se les ubicaron 19 receptores al interior. Cabe resaltar que tres receptores se ubicaron en posiciones donde se encontraban geográficamente las estaciones MED-UNNV, MED-MANT e ITA-CRSV, con el fin de comparar los valores predichos por el modelo contra los registrados por las estaciones y de esta forma, validar parcialmente el desempeño del modelo.

### Condiciones meteorológicas

La predicción del desplazamiento de la pluma (trayectoria de la concentración del contaminante presente en un sector determinado) de una sustancia emitida a la atmósfera alrededor del punto de emisión, es de gran interés en el ámbito de la calidad del aire, y suele ser manejado con los modelos gaussianos de dispersión, permitiendo calcular las concentraciones de sustancias en los puntos de interés y variar las condiciones meteorológicas, las topográficas y las características de fuentes emisoras, para crear escenarios que ayuden a determinar los factores que intervienen en la ocurrencia de las peores condiciones de contaminación (Aregui G, 2014).

Se utilizaron los datos reportados por la estación meteorológica ubicada en la Universidad Nacional- Núcleo el Volador (MED-UNNV) y el radiómetro operado por el SIATA (sistema de alertas tempranas del Valle de Aburrá). Una vez realizado los ajustes de los datos, se procedió a la elaboración de la capa meteorológica AERMET, para integrar a la construcción del modelo; en este caso, inicialmente se implementó el modelo matemático propuesto por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) mediante rutinas en el programa MATLAB.

### Selección de celdas para discretizar las fuentes móviles

Para desarrollar la discretización se utilizó la información reportada por la plataforma SIMECA, la cual realiza pronósticos de calidad del aire para diferentes periodos de tiempo mediante el empleo del modelo CAMx. Los resultados que generó el modelo para PM<sub>2.5</sub> permitieron la identificación de zonas de máxima concentración en dos temporadas, la primera de lluvias (octubre) y la segunda seca (diciembre).

Los resultados de los pronósticos, se consideraron para dos periodos diferentes, el primero en octubre, caracterizado por baja dispersión de los contaminantes, donde se encontró que las celdas que presentaron mayores concentraciones de PM<sub>2.5</sub> se ubicaban hacia la zona centro del municipio de Medellín y hacia el sur del Valle de Aburrá. Para el segundo periodo correspondiente al mes de diciembre, las mayores concentraciones se presentaron hacia la zona del municipio de Itagüí.

Apoyados en los resultados anteriores se seleccionaron las celdas 1700 y 1760; la primera contenía la estación MED-UNNV catalogada como estación de fondo urbano (poblacional) e influenciada por el tráfico vehicular proveniente de vías arterias como la Autopista Norte, la Avenida Regional y la Carrera 65. La segunda celda, es característica del centro de la ciudad (estación MED-MANT) y contaba con el registro de datos de tres estaciones. También fue seleccionada la celda 2296, debido a que presentaba concentraciones máximas predichas por el modelo CAMx y dentro de ésta se encontraba ubicada la estación ITA-CRSV.



Una vez seleccionadas las celdas, se procedió a trazar las vías en éstas, teniendo en cuenta la información de aforos vehiculares, es decir, el conteo de vehículos. Por último, las emisiones de cada una de las vías se estimaron a partir de la longitud y el aforo para cada una de ellas; luego con la información dada para la emisión de la celda de 1 km<sup>2</sup>. se estimaron las emisiones lineales.

## Desarrollo del modelo de dispersión

Los principales pasos involucrados en la implementación del modelo de dispersión AERMOD, se resumen a continuación:

**-Paso 1:** Uso de la herramienta AERMET (Preprocesador Meteorológico) para la generación de los archivos Surface (.SFC) y Profiles (.PLF), los cuales son producto de datos de observaciones de la parte alta de la atmósfera, meteorológicos de superficie y de usos del suelo.

**-Paso 2:** Empleo de la herramienta AERMAP (Preprocesador de terreno) que usa la información del terreno (generalmente un archivo DEM), la localización de los receptores y de las fuentes, y suministra como salida la ubicación y elevaciones de los receptores y fuentes.

**-Paso 3:** Empleo de la herramienta BPPIPRIME (Building Profile Input Program for PRIME), que usa la información de las dimensiones de estructuras (edificios, casas, bodegas, estadios, etc.), y proporciona como salida las dimensiones proyectadas de las construcciones ingresadas.

**-Paso 4:** Ingreso de las concentraciones de fondo y de las emisiones generadas.

## Construcción de mapas regionales de la contaminación

Para la generación de mapas que reflejaran la distribución espacial y temporal de la contaminación dentro del Valle de Aburrá, se aplicó la interpolación espacial, la cual se caracteriza por aprovechar la información georreferenciada de una variable y mediante algoritmos de interpolación espacial, generar una superficie continua a partir de la información de los puntos ingresados.

Para la generación de los mapas regionales de contaminación, se utilizaron como variables de entrada las concentraciones anuales de los contaminantes PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, valores estimados con la información reportada por las estaciones de calidad del aire del Valle de Aburrá, y que se encuentran disponibles a través de la base de datos en línea SCALAR.

## Escenarios de simulación

Se realizaron dos estimaciones del modelo en tres escenarios diferentes, los cuales se distinguían en la forma en que se ingresaban las fuentes de emisión. Para el caso de los escenarios 1 y 2 se ubicaron 1.864 receptores a lo largo del Valle de Aburrá a una distancia de 500 m entre ellos; la distribución seleccionada permitió identificar el comportamiento de los diferentes contaminantes dentro del Valle, sin generar tiempos muy grandes de ejecución del modelo. Por otro lado, para el escenario 3, las emisiones de fuentes fijas se ingresaron como fuentes puntuales al modelo. A continuación, se describe cada uno de los escenarios:

**Primer escenario:** el modelo se estimó ingresando las fuentes móviles y fijas como fuentes de área con una dimensión de 1 km<sup>2</sup>.

**Segundo escenario:** se empleó la base de datos del AMVA con las fuentes fijas ubicadas dentro de su jurisdicción, y las fuentes móviles se ingresaron como en el escenario 1.



**Tercer escenario:** se discretizaron las emisiones de fuentes móviles dadas como fuentes de área de las celdas 1700, 1760, y 2296, y sus emisiones se ingresaron como fuentes lineales para las diferentes vías al interior de estas celdas que poseían información de aforos.

## 2.3.2 RESULTADOS

A continuación, se presenta los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios en los que se corrió el modelo:

### Resultados del modelo AERMOD para el escenario 1

#### Resultados para el contaminante $PM_{10}$

Para un periodo de 24 horas el modelo predice las máximas concentraciones para el área comprendida por la celda 935 (ubicada en Jurisdicción del municipio de Girardota) y sus alrededores; lo anterior debido a que para dicha celda se registró un valor de emisión anual de 495,44 Mg/año<sup>5</sup>, el cual es 6 veces superior al valor que le antecede (82.47 Mg/año). Las otras zonas que presentaron concentraciones altas se ubican hacia el sur del Valle de Aburrá, coincidiendo con la presencia de celdas donde las emisiones provenientes de las fuentes fijas son superiores en relación a los alrededores (celdas 1999 y 2297 con 82.47 y 52.45 Mg /año respectivamente).

#### Resultados para el contaminante $PM_{2.5}$

Para el caso del  $PM_{2.5}$ , las máximas concentraciones registradas por el modelo se ubicaron hacia la zona centro de Medellín, coincidiendo con las celdas de mayor emisión provenientes de las fuentes móviles. Si se comparan los niveles de emisión máximos de  $PM_{10}$  con los de  $PM_{2.5}$  para el periodo de 24 horas, se encuentra que los valores máximos de  $PM_{2.5}$  son superiores a los de  $PM_{10}$ , lo cual se debe a las emisiones reportadas para el contaminante  $PM_{10}$ , las cuales, para el año 2015 fueron inferiores a las de  $PM_{2.5}$  en fuentes móviles, presentando valores de 240 Mg/año y  $PM_{2.5}$  1508 Mg/año respectivamente, esto no parecía muy lógico, debido a que el  $PM_{2.5}$  es una fracción del  $PM_{10}$ . Por otro lado, para las emisiones de fuentes fijas, la misma base de datos del MODEAM para el periodo 2016, reportó valores de 1151.04 Mg/año y 332.61 Mg/año para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  respectivamente (AMVA & UPB, 2017), valores que son coherentes con lo esperado para la distribución de partículas generadas por las emisiones de resultados del modelo AERMOD para el escenario 2.

### Resultados del modelo AERMOD para el escenario 2

Para el segundo escenario las fuentes fijas se ingresaron como fuentes puntuales y las fuentes móviles como de área. En este caso discrepan las zonas de mayor concentración con las presentadas en el escenario anterior; esto se debe a las diferencias entre la fuentes de información de emisiones utilizadas para el análisis, de tal forma que si las fuentes se ingresan como emisiones de área, la zona de mayor emisión corresponde una celda ubicada en jurisdicción del municipio de Girardota, mientras que cuando las fuentes fijas se ingresan como fuentes puntuales, la mayor cantidad de éstas, se encuentra en la zona comprendida entre los municipios de Medellín (al sur)

5 Mg/año: Megagramo/año, donde 1Mg=106 gramos





e Itagüí (al norte), y es en dicha zona donde el modelo para el escenario 2 predice las máximas concentraciones.

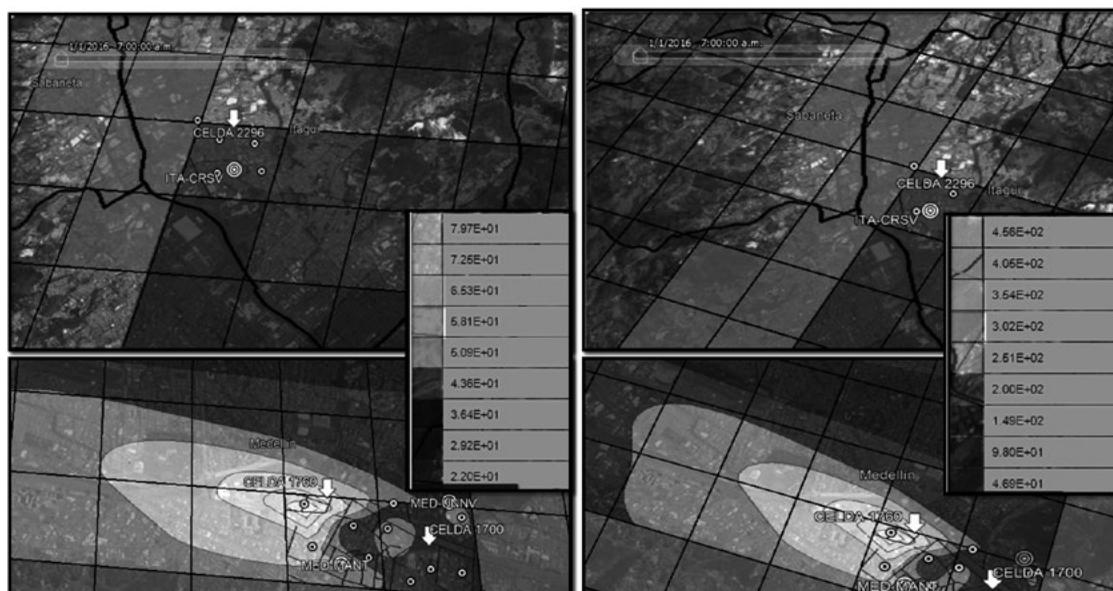
Otra diferencia entre los resultados de ambos escenarios se da en los niveles máximos mostrados en ambas escalas, la primera muestra  $147 \mu\text{g}/\text{m}^3$  mientras la segunda  $83,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , esto indica una reducción en los valores máximos predichos por el modelo del orden de 43,2% con relación al valor del escenario 1 de  $\text{PM}_{10}$ . Para el  $\text{PM}_{2,5}$  el comportamiento es similar para ambos escenarios.

### Resultados del modelo AERMOD para el escenario 3

El tercer escenario se dio cuando se discretizó la información de las fuentes móviles para las celdas 1700, 1760 y 2296, donde se pasa de fuentes de área a fuentes lineales. El modelo se ejecutó para los periodos de 24 horas, un mes y un año, y se ubicaron receptores al interior de estas celdas, lo anterior con el fin de observar cómo era el comportamiento y predicciones del modelo en una escala de visualización más pequeña, aunque el modelo para estimar las concentraciones se ejecutó con todo el inventario de emisiones disponible del Valle de Aburrá. Se eligieron 19 receptores, cabe destacar que tres de estos coincidían con la ubicación de estaciones de mediciones de calidad del aire (MED-UNNV, MED-MANT e ITA-CRSV).

Las concentraciones máximas predichas por el modelo decayeron rápidamente cuando pasó del periodo de 24 horas a un año, lo anterior se debe a que el modelo de dispersión AERMOD para periodos cortos tiende a sobreestimar los niveles, pero a medida que el periodo de tiempo se hace mas extenso los niveles promedios estimados son mas cercanos a los valores reales, en este caso, al compararse los resultados para los periodos anual y mensual contra el máximo diario, se encontró que las predicciones del modelo eran más cercanas a los valores medidos para los primeros. La Figura 14 muestra las concentraciones predichas por el modelo para el periodo de 24 horas para los contaminantes  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{PM}_{10}$ , donde se puede observar una gran semejanza en la forma de las curvas de isoconcentración para ambos contaminantes, donde las zonas de mayor concentración se presenta alrededor de la zona de la celda 1760.

**Figura 14.** Concentraciones máximas de material particulado  $\text{PM}_{10}$  (izquierda) y  $\text{PM}_{2,5}$  (derecha) en 19 receptores seleccionados, para un periodo de 24h, escenario tres





En la **Tabla 12** se muestran los resultados de las concentraciones máximas para los periodos de tiempo diario, mensual y anual, predichos por el modelo para las ubicaciones de las estaciones MED-MANT, MED-UNNV e ITA-CRSV, así como los valores registrados por dichas estaciones de calidad del aire para los contaminantes que fueron monitoreados, durante el periodo 2015-2016.

Los valores de la **Tabla 12** presentan concentraciones de PM<sub>10</sub> predichas por el modelo en la ubicación de las tres estaciones seleccionadas inferiores a las registradas por el sistema de Vigilancia de Calidad del Aire, implicando que la información requerida por el modelo no permite explicar en su totalidad la variación de éste contaminante, generando subestimaciones del mismo.

Para el PM<sub>2.5</sub>, las concentraciones máximas predichas por el modelo en periodos de un mes y un año, presentaron un factor inferior a 2, demostrando el buen desempeño de éste para periodos largos, por el contrario, cuando el periodo evaluado correspondía a 24 horas, las predicciones eran más imprecisas encontrándose diferencias superiores al 100% (factores > 2).

**Tabla 12.** Concentraciones máximas de contaminantes para periodos de 24 horas, un mes y un año, reportadas por estaciones de la Red de Monitoreo y modeladas por AERMOD

Estación	Contaminante	Monitoreado	Coordenadas UTM ZONA 18		Periodo	AERMOD (µg/m³)	Red SCALAR (µg/m³)	Diferencia (%)	Factor de predicción
			X	Y					
MED-UNNV	PM <sub>10</sub>	NO	436185,0	692347,0	Diario	50,73	-----	-----	-----
					Mensual	16,73	-----	-----	-----
					Anual	11,26	-----	-----	-----
	PM <sub>2.5</sub>	SI			Diario	233,12	103,3	125,7	2,26
					Mensual	65,10	67,8	4,0	1,04
					Anual	40,17	32,1	25,1	1,25
MED-MANT	PM <sub>10</sub>	SI	436993,5	691157,4	Diario	59,86	148,0	59,6	2,47
					Mensual	20,46	102,2	80,0	5,00
					Anual	14,19	63,8	77,8	4,50
	PM <sub>2.5</sub>	SI			Diario	317,8	113,0	181,2	2,81
					Mensual	90,68	74,2	22,2	1,22
					Anual	62,11	39,7	56,4	1,56
ITA-CRSV	PM <sub>10</sub>	SI	432856,0	682210,0	Diario	35,33	144,0	75,5	4,08
					Mensual	20,02	89,9	77,7	4,49
					Anual	18,66	53,5	65,1	2,87
	PM <sub>2.5</sub>	NO			Diario	52,85	-----	-----	-----
					mensual	16,82	-----	-----	-----
					Anual	15,12	-----	-----	-----





## Mapas regionales

Con el fin de identificar las zonas que presentaron los mayores niveles de concentración para los contaminantes PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, se dispuso de la generación de mapas regionales (que cubren gran parte del Valle de Aburrá), los cuales se construyeron a partir de los promedios anuales de los datos reportados por cada una de las estaciones que monitorearon los contaminantes mencionados durante los años 2012 a 2016 (**Tabla 13 y Tabla 14**).

**Tabla 13.** Concentraciones promedio anuales de PM<sub>2,5</sub> registradas por estaciones de la red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Fuente: plataforma MODEAM<sup>6</sup>

Estación	Tipo de estación	UTM 18 N		Concentración (µg/m <sup>3</sup> )								
		X	Y	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BEL-SESB	Urbana de Fondo	438308,05	699878,33	----	----	----	----	----	----	----	----	16,95
CAL-LASA	Suburbana de Fondo	429335,05	674199,06	----	----	----	----	20,45	24,33	25,21	29,58	33,37
GIR-INDER	Suburbana de Fondo	450108,59	704421,52	----	----	----	----	----	14,99	----	----	----
GIR-SOSN	Suburbana de Fondo	450123,08	705055,83	----	----	----	----	----	----	----	20,62	24,40
ITA-CJUS	Urbana Industrial	433929,08	683765,77	----	----	----	----	25,40	27,50	31,76	28,08	29,34
ITA-CONC	Suburbana de Fondo	428710,21	681873,73	----	----	----	----	24,55	25,53	25,04	24,20	25,66
ITA-DITA	Urbana de Fondo	430533,27	681976,13		29,49	28,56	23,18	28,09	----	----	----	----
MED-AGUI	Urbana de Tendencia Mesoescala	437082,51	691221,58	35,00	29,24	24,05	28,66	25,68	----	----	----	----
MED-LAYE	Suburbana de Fondo	439081,08	683414,75	----	----	----	----	----	----	----	21,05	26,88
MED-POBL	Suburbana de Fondo	438413,23	683794,41	----	----	----	----	26,09	23,51	25,47	28,80	----
MED-UNNV	Urbana de Fondo	436173,00	692353,00	----	----	----	----	27,48	28,13	29,95	31,97	32,98
MED-JABO	Urbana de Fondo	437588,92	693364,24	----	----	----	23,20	24,39	----	----	----	----
MED-MANT	Urbana de Trafico	436993,50	691157,45	----	----	----	----	36,77	34,92	37,35	39,48	39,02
MED-PJIC	Urbana de Trafico	436082,67	686340,06	29,72	24,50	26,16	20,21	22,54	20,46	24,91	21,95	33,78
MED-UCES	Suburbana de Fondo	438762,08	686245,12	22,18	24,93	26,56	----	----	----	----	----	----
MED-UNFM	Urbana de Trafico	434452,40	693530,65	----	----	----	25,95	17,16	21,38	28,56	26,37	35,04
MOV-EST-METR	Urbana de Trafico	430574,52	680082,37	----	----	----	----	----	----	41,92	50,90	50,24

NOTA: Las celdas con la raya punteada identifican los periodos para los cuales no se tenía reporte de datos del contaminante por parte de la estación.

6 Fuente: [http://modemed.upb.edu.co/zigma2/index.php?option=com\\_content&view=article&id=116&Itemid=532](http://modemed.upb.edu.co/zigma2/index.php?option=com_content&view=article&id=116&Itemid=532)



**Tabla 14.** Concentraciones promedio anuales de PM<sub>10</sub> registradas por estaciones de la red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Fuente: plataforma MODEAM<sup>7</sup>

Estación	Tipo de estación	UTM 18 N		Concentración (µg/m <sup>3</sup> )								
		X	Y	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
BAR-HSVP	Suburbana de Fondo	463169,62	711433,49	35,25	39,46	35,79	34,60	32,27	30,69	32,53	29,75	42,16
BEL-SEPM	Urbana de Trafico	440518,98	700674,16	65,72	64,64	54,02	----	54,02	----	54,02	----	54,02
BEL-USBV	Suburbana de Fondo	437107,58	699787,26	----	----	----	----	34,06	36,72	42,79	45,27	46,02
CAL-PMER	Urbana de Trafico	429794,02	673386,29	58,90	61,46	50,67	41,58	45,17	44,53	48,62	45,19	59,11
COP-HSMA	Suburbana de Fondo	444176,39	701898,82	43,04	43,38	40,70	37,27	37,40	36,06	35,82	30,99	44,07
EST-CAM	Urbana de Fondo	429034,27	680695,83	50,23	52,91	43,65	37,64	37,94	36,63	----	----	----
EST-MAGO	Urbana Industrial	429648,21	680050,22	----	----	----	----	----	----	48,26	48,21	51,22
GIR-IECO	Urbana de Fondo	450139,53	705056,23	41,63	43,92	46,43	37,50	40,66	42,66	45,59	50,30	48,28
ITA-CONC	Suburbana de Fondo	428728,32	681863,13	----	----	----	----	40,37	47,48	50,68	50,23	49,46
ITA-CRSV	Urbana Industrial	432877,92	682196,05	61,49	61,59	57,90	54,64	59,97	60,06	57,01	53,49	51,67
ITA-DITA	Urbana de Fondo	430541,79	681953,09	48,21	50,41	48,25	48,49	50,81	----	----	----	----
ITA-PTAR	Urbana de Tendencia Mesoescala	434970,25	684343,29	63,76	57,26	47,52	37,04	36,11	35,21	42,90	42,20	54,33
MED-AGUI	Urbana de Tendencia Mesoescala	437098,26	691219,63	65,15	59,69	45,47	45,62	45,90	----	----	----	----
MED-CORA	Urbana de Tendencia Mesoescala	435561,33	690822,11	----	53,81	52,23	45,20	40,49	37,76	39,42	40,38	47,09
MED-EXSA	Urbana de Tendencia Mesoescala	436944,14	690789,88	60,95	55,27	61,87	56,42	53,33	57,87	62,80	66,77	58,62
MED-MANT	Urbana de Trafico	437006,00	691158,32	----	----	----	----	----	----	----	63,76	66,77
MED-VIHE	Suburbana de Fondo	438573,28	691218,06	----	----	----	----	----	----	----	27,44	40,89
MED-PJIC	Urbana de Trafico	436109,56	686338,08	66,70	56,35	56,40	50,81	48,28	46,27	46,07	40,89	54,68
MED-UDEA	Urbana de Fondo	436977,40	693123,68	57,92	51,38	48,96	----	----	----	----	----	----
MED-UDEM	Suburbana de Trafico	432547,29	688675,92	56,00	47,28	46,59	----	----	----	----	----	----
MED-UNFM	Urbana de Trafico	434458,09	693525,68	81,00	68,98	66,32	58,63	71,88	40,29	44,52	39,67	51,22
MED-MIRA	Suburbana de Fondo	439246,65	688637,86	----	----	----	----	----	33,05	35,58	33,95	----
SAB-CAM	Urbana de Tendencia Mesoescala	431830,29	679894,12	51,66	53,21	49,08	48,16	44,82	39,74	43,42	42,08	56,38

NOTA: Las celdas con la raya punteada identifican los periodos para los cuales no se tenía reporte de datos del contaminante por parte de la estación.

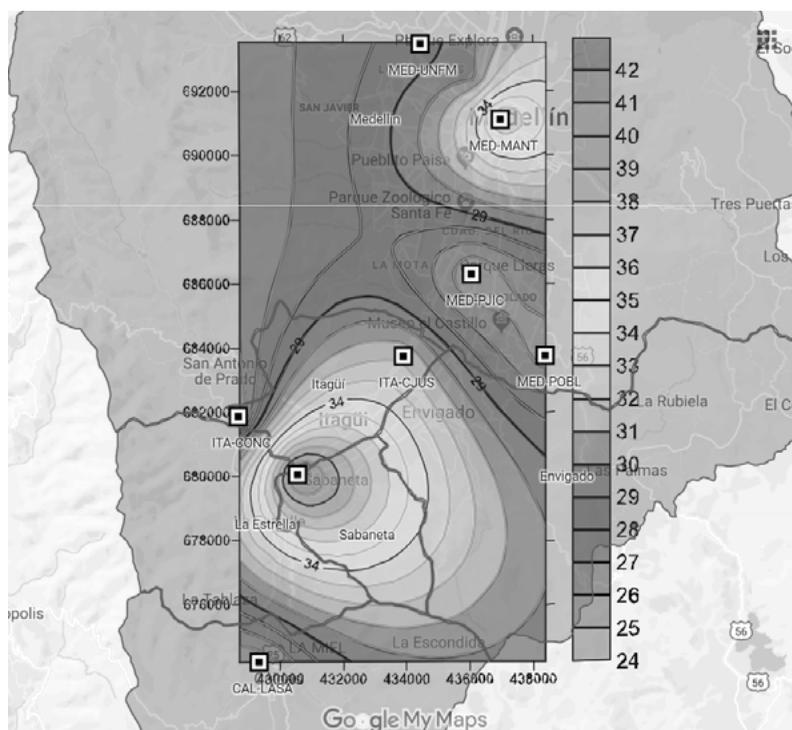
<sup>7</sup> Es una técnica que se caracteriza por aprovechar la información georreferenciada de una variable y mediante potentes algoritmos de interpolación espacial utiliza puntos con valores conocidos para estimar valores desconocidos en otros puntos.







**Figura 16.** Distribución espacial de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  para el año 2014, Valle de Aburrá.



La **Figura 16**, muestra la medición reportada por la estación MED-MANT que representó la concentración del centro de Medellín, dicha medición no estuvo acorde con lo predicho por el modelo de dispersión AERMOD, donde se esperaba que en el centro de la ciudad, se presentaran las concentraciones máximas, producto de las altas emisiones provenientes de las fuentes móviles en la zona. Para la zona sur del Valle se presentó un amplio sector de altas concentraciones generada por la influencia que tienen las concentraciones reportadas por la estación EST-METR ( $50,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), valor muy superior a los restantes valores reportados por las estaciones vecinas que son de  $28,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $24,04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para ITA-CJUS e ITA-CONC respectivamente.



## 2.4 CONCLUSIONES

-Los métodos de imputación presentan una alternativa robusta para la estimación de datos no disponibles en las series de contaminantes; sin embargo, la efectividad del método depende en gran medida de la distribución de los valores en la serie y la magnitud de los periodos con información faltante, además de la calidad de las series de las variables explicativas requeridas en la aplicación de algunos métodos.

-En el momento de obtener una serie única de un contaminante para un municipio, a partir de series medidas en diferentes estaciones, se encontró que es posible evaluar el aporte que cada serie tiene, generando así una serie compuesta de los efectos tanto individuales como en conjunto, lo anterior es de gran utilidad para el análisis de la asociación de los efectos de la contaminación atmosférica en la salud de la población, debido a que genera información robusta y más completa en cuanto a datos ambientales que de otra manera, serían insuficientes, para ser relacionados con datos de salud.

-En general, los municipios ubicados al sur del Valle de Aburrá presentaron mayores días de excedencias, por el contrario, los municipios ubicados al norte del Valle presentaron un número menor de días con valores por encima del umbral establecido por la normatividad nacional e internacional. El mayor porcentaje de excedencias para  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  se presentó en los municipios Medellín, La Estrella e Itagüí, respectivamente; sin embargo, en la mayoría de las series se observó un aumento del número de días de excedencias para ambas normas en los últimos años del periodo de medición evaluado.

-Para la mayoría de los municipios se presentaron tendencias decrecientes para  $PM_{10}$  y crecientes para  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ . Estos resultados implican que, para los dos últimos contaminantes, las concentraciones han aumentado en el tiempo evaluado, posiblemente relacionado a la ocurrencia de los picos de contaminación desde el año 2014 en ciertas épocas del año.

-El modelo de dispersión AERMOD, permitió en este caso caracterizar el comportamiento de los contaminantes  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  a partir del desarrollo de un inventario de fuentes de emisiones móviles y fijas, el cual es el factor principal que determina el nivel de confianza en las predicciones del modelo de dispersión, junto con el periodo de tiempo para el que se ejecuta el modelo.

-En el caso del contaminante  $PM_{2.5}$  para periodos de un mes y un año, el nivel de confianza de las predicciones del modelo fue mayor que para el contaminante  $PM_{10}$  que presentaba dificultades en su inventario de emisiones; y en el caso de periodos cortos de tiempo (24 h), para ninguno de los dos contaminantes las estimaciones del modelo difirieron en gran medida de los valores observados.

-Los mapas regionales elaborados para los contaminantes mostraron algunas semejanzas con respecto a los niveles de contaminación esperados para algunas zonas dentro del Valle de Aburrá, encontrando que, bajo determinadas condiciones, la distribución espacial pronosticada realiza una buena representación de la realidad, sin embargo; la ausencia de información reportada por estaciones de un mismo tipo, hizo que en algunos mapas la interpolación espacial generara resultados con cierta discrepancia. Adicionalmente no se contaba con la cantidad suficiente de estaciones de un mismo tipo para poder generar una superficie representativa de la zona de estudio (Valle de Aburrá).



-Las diferentes aplicaciones del modelo AERMOD permitieron observar su potencial en la predicción de la exposición a los contaminantes, producto de las emisiones de fuentes móviles, fijas o de área, sin embargo, las predicciones del modelo demostraron estar alejadas de lo esperado en la mayoría de los escenarios evaluados. Teniendo en cuenta esto, el desarrollo de un modelo para caracterizar el comportamiento de la contaminación atmosférica según variables de lugar y tiempo, fue útil en la medida que logró hacer predicciones de la forma como se presenta la contaminación en áreas pequeñas y periodos largos de tiempo.

Lo anterior corrobora la utilidad de estas herramientas para disponer los datos ambientales (concentraciones de los contaminantes) de manera que puedan utilizarse en análisis epidemiológicos como lo han empleado con éxito algunas investigaciones que han pretendido determinar la asociación entre la contaminación atmosférica y eventos en salud. (Kloog et al., 2014; Patto, Nascimento, Mantovani, Viera, & Moreira, 2016; Zúñiga et al., 2016).









## CAPÍTULO 3

# CALIDAD DEL AIRE Y MORBIMORTALIDAD EN LOS MUNICIPIOS DEL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ 2008-2015

En este apartado se presenta el análisis epidemiológico que permitió establecer la relación entre la morbilidad<sup>1</sup>, la mortalidad<sup>2</sup> y los contaminantes atmosféricos ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$ ) que se consideran críticos por sus implicaciones en la salud de la población. Para este fin se realizó un estudio ecológico de series de tiempo tipo Modelo Aditivo Generalizado de regresión de Poisson, soportado en información sobre los eventos en salud que en el contexto del estudio se denominan eventos centinela y el análisis de la distribución de los contaminantes indicados en función de dichos eventos.

El proceso previo a la obtención de los resultados empíricos incluyó: 1) la identificación de los eventos centinela relacionados con la contaminación atmosférica, es decir, aquellas enfermedades cuya ocurrencia sirve como una señal de advertencia para fortalecer las acciones preventivas o terapéuticas. Estas fueron seleccionadas mediante la recolección de evidencias a partir de revisiones organizadas de fuentes de información, así como de revisiones sistemáticas que permitieron caracterizar, desde el abordaje de la patogenia de la enfermedad y la epidemiología, los efectos de los contaminantes en la salud, lo cual dio como resultado las enfermedades asociadas a la contaminación ambiental; 2) la construcción de las bases de datos para el análisis de información; 3) el desarrollo de un plan de análisis estadístico a partir de la integración de información

---

1 La morbilidad es un término de uso médico y científico, que sirve para señalar la cantidad de personas o individuos considerados enfermos o víctimas de una enfermedad en un espacio y tiempo determinados. La morbilidad se expresa cuantitativamente y su análisis permite valorar el aumento o disminución de los casos/frecuencias relativas/tasas de las enfermedades en un espacio específico. (Hernández-Aguado, Gil de Miguel, & Delgado, 2011)

2 La mortalidad es una expresión demográfica que designa el número de defunciones ocurridas en una población, en un tiempo y lugar determinados. Es un indicador que permite valorar la situación de salud de las poblaciones y junto con los indicadores de morbilidad permite apoyar la planeación y gestión de las políticas públicas sanitarias (Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, 2013)



atmosférica, meteorológica y de morbimortalidad que permitiera establecer la relación entre eventos en salud y la exposición a corto plazo a las concentraciones de los contaminantes criterio; 4) la construcción de modelos explicativos para los eventos en salud, en función de las variables meteorológicas y de las exposiciones a los contaminantes ; y 5) el análisis de los episodios de contaminación atmosférica . Todos los procedimientos y resultados se presentan de manera resumida en este capítulo y se detallan en el anexo 6 para ampliación del lector.

## 3.1 OBJETIVOS

-Determinar el efecto de las exposiciones a los contaminantes atmosféricos, las variables meteorológicas y factores ambientales en el número de casos de morbilidad y muertes por los eventos centinela de interés, en los municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá durante el periodo 2008-2015.

-Estimar el efecto de los episodios de contaminación del aire ocurridos en el AMVA en el periodo de estudio sobre los casos de eventos centinela ajustado por variables atmosféricas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2008-2015.

## 3.2 COMPONENTE METODOLÓGICO

Se realizó un estudio ecológico de series de tiempo en el cual la unidad de análisis fueron los distintos grupos poblacionales de cada uno de los 10 municipios del Valle de Aburrá. Este diseño es empleado en la epidemiología ambiental para establecer la relación de eventos en salud con exposiciones de corto plazo (horas/días) a la contaminación atmosférica. A diferencia de otros diseños, como los estudios de cohorte, donde se explora la exposición de largo plazo, estos estudios permiten identificar los eventos agudos de mortalidad y de mortalidad asociados con la contaminación (Katsouyanni et al. 1995; Schwartz et al. 1996; Saez et al 1999).

### 3.2.1 POBLACIÓN Y PERIODO DE ESTUDIO

El estudio tuvo como espacio geográfico de interés, los diez municipios del AMVA, a saber, Medellín, Bello, Itagüí, Envigado, Caldas, Copacabana, La Estrella, Girardota, Sabaneta y Barbosa, que según estimaciones del DANE, para el año 2017 estaban habitados por 3.866.165 personas (DANE, 2013) tal como se presenta en la **Tabla 15**.



**Tabla 15.** Población de los municipios del AMVA, proyectada por el DANE para el año 2017.

Municipio	N	%
Medellín	2.508.452	64,9
Bello	473.423	12,2
Itagüí	273.927	7,1
Envigado	232.903	6,0
Caldas	79.652	2,1
Copacabana	71.885	1,9
La Estrella	64.315	1,7
Girardota	56.755	1,5
Sabaneta	53.236	1,4
Barbosa	51.617	1,3
AMVA	3.866.165	100

Fuente: Dane, Censo General 2005

## 3.2.2 ESTRATEGIA DEL ESTUDIO

Se realizó inicialmente una revisión de literatura sobre análisis de la relación entre la contaminación del aire y la salud que permitió obtener evidencias de tipo clínico, experimental y epidemiológico de dicha relación. Posteriormente se hizo una profundización en las evidencias sobre los eventos centinela relacionados con contaminación atmosférica.

En los estudios en salud ambiental se ha utilizado el término denominado Evento centinela propuesto por Rutstein, Mullan y colaboradores (1983) y posteriormente por Rothwell y colaboradores (1991), los cuales lo definen como una enfermedad prevenible, que ocasiona discapacidad o muerte prematura cuya ocurrencia sirve como señal de advertencia de intervención con acciones preventivas o terapéuticas; estas condiciones son fácilmente reconocibles en la práctica, además cuando son detectadas, es necesario buscar las causas subyacentes, como pueden ser los contaminantes ambientales, entre otros.

Con los insumos derivados de la revisión de evidencias y revisión bibliográfica desarrollada en el apartado afín (capítulo 1), se realizó la selección de los eventos centinela, principalmente las enfermedades de los sistemas circulatorio y respiratorio; para luego proceder a su posterior caracterización.

Utilizando datos de los sistemas de registro de la morbilidad y la mortalidad, se aplicaron las estrategias clínicas y epidemiológicas para la identificación de los casos de los eventos centinela. Para ésta se consideró el modelo descriptivo de la Historia Natural de la Enfermedad (SCRIBD, 2018), el cual se complementó con la definición de los eventos centinela utilizados en la vigilancia epidemiológica.



La historia natural de la enfermedad se refiere al curso de los acontecimientos biológicos entre la acción secuencial de las causas (etiología), el desarrollo de la enfermedad y el desenlace (curación, paso a la cronicidad, discapacidad o muerte), así como sus componentes básicos, entre estos los periodos pre patogénico y patogénico, los cuales corresponden a las manifestaciones de la enfermedad (SCRIBD, 2018).

Para la identificación de los eventos en los sistemas de registro secundarios se utilizó el estándar semántico de la Clasificación Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud (CIE-10); en total se seleccionaron 96 eventos de morbilidad y 111 eventos de mortalidad. Los grupos de enfermedades seleccionados se relacionan a continuación en la **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Eventos centinela seleccionados según grupo diagnóstico de clasificación CIE-10

Código CIE-10	Grupo diagnóstico
I20–I25	Enfermedades isquémicas del corazón
I60–I69	Enfermedades cerebrovasculares
J30–J39	Otras enfermedades de las vías respiratorias superiores
J40–J47	Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores
J60–J70	Enfermedades del pulmón debidas a agentes externos
H65–H75	Enfermedades del oído medio y de la mastoides
J00–J06	Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores
J09–J18	Influenza [gripe] y neumonía
J20–J22	Otras infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores
O60–O75	Complicaciones del trabajo de parto y del parto
O <sub>3</sub> 0–O48	Atención materna relacionada con el feto y la cavidad amniótica y con posibles problemas del parto
P90–P96	Otros trastornos originados en el período perinatal
P05–P08	Trastornos relacionados con la duración de la gestación y el crecimiento fetal

La revisión bibliográfica, además de la elección de eventos centinela, permitió también la elección de las co-variables y factores de ajuste para los análisis epidemiológicos, es decir, posibles variables que potencialmente podrían desempeñar un rol importante en el comportamiento de los desenlaces, número de enfermos o de muertes.

Con los datos de la información en salud y los ambientales, luego de su tratamiento y procesamiento, se aplicaron las técnicas usuales de un estudio ecológico para establecer la asociación entre la variación diaria de cada uno de los contaminantes de interés (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> en µg/m<sup>3</sup>) con los casos de enfermedad y muerte por eventos centinela, sin perder de vista la información que aportaban las variables meteorológicas y demás factores que ayudaban a controlar los sesgos en los resultados.





### 3.2.3 FUENTES DE INFORMACIÓN

A continuación se describen las fuentes de información secundaria, que se consideraron en la prestación de los servicios de salud y en la investigación relacionada con el ambiente, de donde se obtuvieron los datos de los enfermos y de las defunciones las concentraciones de los contaminantes, las condiciones meteorológicas y los factores de ajuste:

**a. Registro Individuales de Prestación de Servicios de Salud (RIPS):** es el conjunto de datos mínimos y básicos que el Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSSS) que requiere para los procesos de dirección, regulación, control y soporte de la atención. Corresponden a las atenciones en salud en relación a las consultas, la atención de urgencias y la hospitalización, los exámenes de laboratorio y otros procedimientos. Estos datos fueron suministrados desde la Secretaría de Salud y Protección Social del departamento de Antioquia.

**b. Sistema de Vigilancia en Salud Pública- SIVIGILA:** Sistema que provee información sistemática y oportuna sobre eventos prioritarios que afectan la salud de la población, administrado por el Instituto Nacional de Salud. Los eventos en salud son notificados por unidades informadoras (UI), como son las Instituciones prestadoras de servicios de salud (IPS) y las Empresas Promotoras de Salud (EPS) y las Unidades Primarias Generadoras de datos (UPGD). Luego se generan procesos de captación, investigación, análisis, administración y notificación de la información. Estos registros se utilizaron como insumo para la construcción de la variable *Día de la presencia de brote de influenza*, utilizada como factor de ajuste en los análisis epidemiológicos para eventos centinela respiratorios.

**c. Registro Único de Afiliados-RUAF Módulo Nacimientos, Defunciones y Registros del DANE:** Estos sistemas utilizan información proveniente del registro civil de defunción y reposan en el cubo de Estadísticas Vitales del Sistema de Información de la Protección Social (SISPRO). Corresponden a los registros diarios de defunciones no fetales acaecidas en los municipios del AMVA.

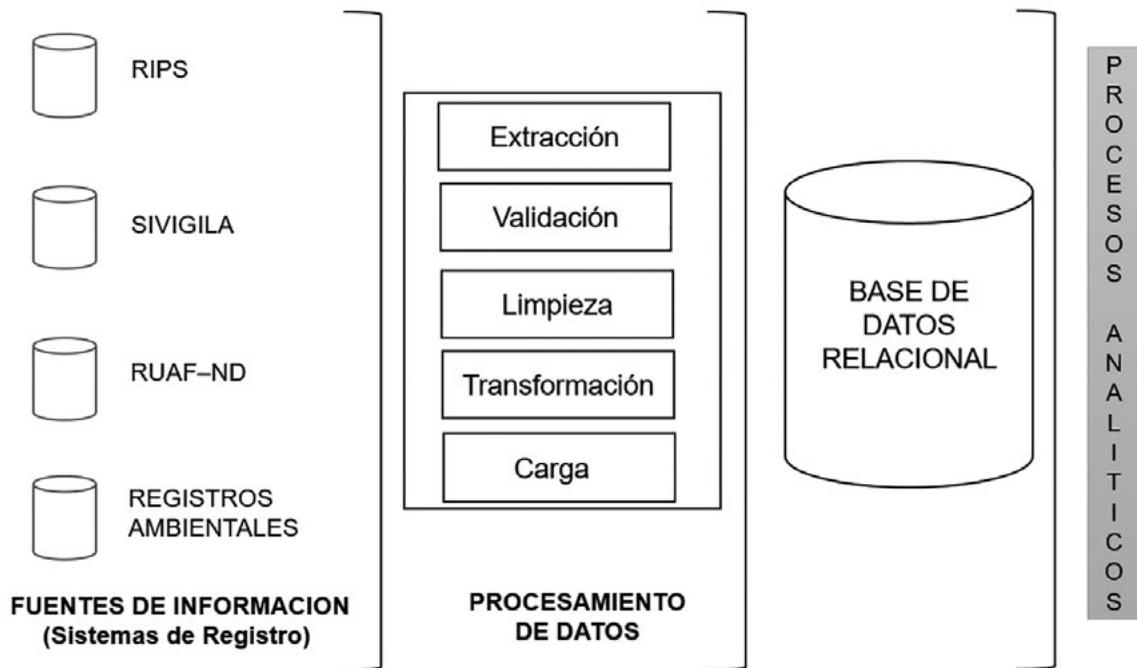
**d. La Red de Vigilancia de la Calidad Aire:** Conformada por las estaciones de monitoreo, realiza el seguimiento de las concentraciones de contaminantes en puntos representativos de los diferentes entornos que conforman el AMVA. Estas estaciones de monitoreo suministraron datos de las concentraciones de contaminantes y las condiciones meteorológicas. Los datos de esta fuente de información fueron objeto de tratamiento, tal como se describió en el capítulo 2.

### 3.2.4 ESTRATEGIA INFORMÁTICA

Definidos los procesos de identificación y delimitación del objeto de estudio, fue implementada la estrategia de la información, la cual se basó en la metodología CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining) (Chapman et al., 2000). Esta metodología provee una vista general al ciclo de vida de los proyectos de minería de datos y describe las fases del mismo, sus tareas y relaciones. Principalmente, en el estudio se efectuaron las tareas de las fases de comprensión y preparación de los datos (Chapman et al., 2000). La primera, relacionada con la recolección de los datos e identificación de problemas de calidad y la segunda con la transformación, limpieza e integración de los mismos. Dichos procedimientos fueron realizados bajo técnicas específicas de extracción, transformación, limpieza y carga (ETL) (Williams, 2010) como se observa en la **Figura 17**.



Figura 17. Procesamiento de los datos utilizados en el Estudio: Proceso ETL



La estructuración configuró el primer paso hacia la consolidación de la base de datos relacional, denominado proceso de extracción de los datos desde los diferentes sistemas de registro. Posteriormente, se realizó la valoración de la calidad de los RIPS en términos de su exactitud, totalidad, oportunidad, relevancia y consistencia; para ello se calcularon indicadores de: duplicidad (relación entre el número de registros con al menos un duplicado y el total de registros), completitud (relación entre el número de atributos con totalidad de datos y el total de atributos y la consistencia de éstos) y el indicador de no respuesta (relación entre los datos con no respuesta o vacíos, y el total de datos esperados para cada atributo).

En el caso de los datos de mortalidad, para corregir los problemas de totalidad se efectuó el ajuste por sub-registro<sup>3</sup> de las muertes ocurridas por eventos centinela en los municipios del AMVA durante el periodo de estudio, utilizando el método de Preston-Coale. Esta técnica estima el sub-registro con base en las defunciones de un año y en la tasa de crecimiento poblacional además de la cobertura relativa a través de la comparación del total de muertes registradas y el número total estimado de muertes en un futuro para los grupos quinquenales de edad y sexo (Organización de Naciones Unidas, 1986).

Luego de efectuar el proceso de transformación, validación y limpieza de los datos de morbilidad, se efectuó la identificación de casos de eventos centinela observados en los servicios de consulta externa, urgencias y hospitalización. Se consideró la remisión entre servicios, existente durante el proceso de atención y la caracterización clínica de los eventos centinela para evitar la sobre-estimación de los casos.

3 El subregistro existe cuando el número de muertes reportado en el sistema de registro no refleja la magnitud real o la frecuencia esperada.





Finalmente, se realizó la carga de los datos a través del diseño e implementación de una base de datos relacional. De este modo, se integraron los datos de mediciones de las concentraciones de los contaminantes, las condiciones meteorológicas, las atenciones y las muertes por eventos centinela, y demás factores de ajuste (día de la semana, día feriado, día festivo y día con presencia de brote de influenza).

La unidad de análisis estuvo constituida por cada registro que contenía datos de las mediciones diarias de la concentración de contaminantes y las condiciones meteorológicas, factores de ajuste, y datos de atenciones en salud y muertes, que compartían la misma fecha de ocurrencia y cuyo diagnóstico principal hizo parte del listado de eventos centinela relacionados con la contaminación atmosférica.

## 3.2.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

### Análisis descriptivo

Se realizó un análisis descriptivo de los enfermos y de las defunciones observadas en el AMVA durante el periodo 2008-2015. Se calculó el peso de la morbilidad por evento centinela sobre el total de la morbilidad en cada municipio; se caracterizaron los casos por eventos centinela identificados en función de los servicios de atención en salud y las variables demográficas. Además, se caracterizaron las defunciones por eventos centinela por municipio y variables demográficas, así como su comportamiento durante el periodo. Finalmente, se analizó la mortalidad a través de tasas ajustadas, permitiendo describir los años potenciales de vida perdidos (APVP) como un complemento a los indicadores tradicionales de mortalidad y que describieron la medición del impacto generado por el grupo de los eventos centinela estudiados.

### Análisis bivariado y multivariado

La determinación de la asociación entre la variación diaria de cada uno de los contaminantes ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  en  $\mu g/m^3$ ) con los casos de enfermedad y muerte por eventos centinela específicos, se realizó a partir de la construcción de Modelos Aditivos Generalizados (Generalized Additive Models, GAM, por sus iniciales en inglés). Los modelos generados fueron de tipo explicativo, es decir, no sólo describieron la información, sino también permitieron sugerir relaciones entre la variación de los contaminantes y los casos.

Inicialmente, se realizó un análisis descriptivo bivariado con el fin de explorar asociaciones estadísticas significativas entre las variables que integrarían los modelos. Se evaluó la existencia de diferencias estadísticas mediante el análisis de la varianza de una vía (o su equivalente no paramétrico Anova de Kruskal Wallis) y la prueba t para diferencia de promedios (o su equivalente no paramétrica prueba de Mann Whitney).

Se construyeron GAM para cada uno de los municipios que constituyen el AMVA, para cada evento centinela elegido discriminando entre la población total, hombres y mujeres, pertenecientes a los grupos etarios: menores de 5 años y de 65 y más años. La elección de estos grupos estuvo igualmente soportada por la revisión de la literatura, donde se confirmó que los niños y ancianos son grupos susceptibles de afectación respiratoria por los contaminantes atmosféricos (Jasinski, Pereira, & Braga, 2011), al igual que se ha corroborado mayor asociación de enfermedades del sistema circulatorio (como las enfermedades cardíacas isquémicas) con la contaminación atmosférica en la población adulta mayor (Brook et al., 2010).



En el ajuste del modelo, se incluyeron una a una las co-variables humedad relativa (%), la temperatura (°C) promedio diaria y la precipitación (mm día), y los factores día de la semana (domingo, lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado), día festivo (Si-No), día feriado (Si-No) y día con presencia de brote de influenza (Si-No). Posteriormente, se descartaron aquellas variables no significativas para la explicación de la variación en casos de enfermedad o muerte por eventos centinela.

Se analizó el poder explicativo de los modelos y dado que el efecto del contaminante sobre el número de casos o muertes por una enfermedad en cuestión, puede ocurrir en el día concurrente o hasta un número de días después de haberse presentado la exposición, la estimación de este riesgo se hizo teniendo en cuenta la técnica de rezagos distribuidos, es decir, el número acumulado de días de rezago.

**Los rezagos** se definen como los días en que se asume que hay un cambio o efecto en el evento en salud debido al incremento en las concentraciones del contaminante analizado. Para efectos del estudio se utilizaron dos tipos de rezago; por un lado, se empleó la técnica del rezago puntual, que se traduce en que, por ejemplo, al considerar un día de rezago (rezago 1), se asume que un incremento en la concentración del contaminante en un día cualquiera, estaría generando una variación en los casos o muertes por eventos centinela un día después. Por otro lado, la técnica de rezagos distribuidos asume que existe un efecto acumulado de las concentraciones del contaminante durante varios días; por ejemplo, el rezago 0-3 estaría refiriéndose al efecto acumulado durante 3 días de exposición. En este orden de ideas, para el estudio se consideraron los rezagos puntuales de cero y distribuidos de 0 a 15 días para explorar el efecto en la morbilidad y el rezago distribuido de 0 a 7 días en el caso de la mortalidad.

Adicionalmente, en situaciones donde fue requerido, las co-variables fueron suavizadas con el fin de ajustar su comportamiento frente al contaminante evaluado. El cambio en el riesgo de enfermedad o muertes por cada incremento de  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  conocido como estimador de la regresión,  $\beta$ , se "exponenció" con el fin de conocer la medida de la asociación que expresara el incremento del porcentaje en el desenlace. Valga advertir que, siguiendo las recomendaciones de investigadores del área de epidemiología ambiental, con el fin de darle plausibilidad biológica al resultado, el cambio del número de enfermos o muertes se hizo por cada incremento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  del contaminante. Así, una vez calculado este, se le sustrajo la unidad, 1, con el fin de expresarlo en porcentaje, esto es,

$\%e^{\beta} = e^{\beta} - 1$ . donde, (Porcentaje de exponente de beta): Indica el incremento porcentual del riesgo de enfermar o morir por cada incremento de  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el contaminante, siempre que permanezcan constantes las demás variables del modelo.

## Análisis de episodios de contaminación atmosférica

Se analizaron los efectos de los contaminantes criterio sobre la morbilidad y la mortalidad asociados a los episodios atmosféricos evidenciados en el AMVA durante el periodo 2009-2015. Estos hacen referencia al desbordamiento de valores establecidos para las concentraciones de los contaminantes, donde se ve afectada la salud de quienes se exponen a dichas concentraciones. Con base en la revisión de la literatura internacional (Anderson 1999; Kim et al 2012; Zhang et al 2017), en este estudio se asumió como episodio de contaminación atmosférica aquel periodo de



tres o más días consecutivos en los que las concentraciones diarias de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  exceden el umbral de tres veces los valores límite recomendados por la guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

Para los episodios identificados se calcularon las estadísticas de resumen pertinentes de las concentraciones diarias de los contaminantes involucrados. Las pruebas estadísticas de diferencias de medias (Mann-Whitney) y el estimador de la pendiente de Sen dieron señales, en el primer caso, del cambio de nivel del contaminante y en el segundo del comportamiento creciente o decreciente de las concentraciones diarias de los contaminantes en los tramos de series analizados, con su respectiva significación estadística del 5%.

Para explorar los eventuales efectos adversos en salud de los episodios de contaminación identificados, se aplicó inicialmente el análisis simple de serie temporal interrumpida, estableciendo con la prueba no paramétrica de Mann Kendall el cambio estructural en las tendencias de los dos tramos de la serie de casos de interés (antes y después de la presentación del episodio de contaminación). Posteriormente se ajustaron modelos GAM de Poisson, admitiendo como variable respuesta el número de muertes y enfermos diarios por algunas causas centinela, para niños menores de 5 años y adultos con 65 o más años. Se asumieron modelos de rezagos puntuales y rezagos distribuidos descritos anteriormente, el efecto de interés se estimó en términos de las variaciones porcentuales en el riesgo de morir o enfermar asociadas a un incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el contaminante analizado.

En la construcción de estos GAM se tuvieron en cuenta los factores y las covariables de ajuste ya señalados. Sin embargo, con el fin de ampliar la exploración de los efectos de los episodios de contaminación, en este caso se ajustaron modelos con la incorporación de los contaminantes no sólo como variables continuas sino también como variables categóricas. En este sentido, se asumió inicialmente la variable dicotómica "Día de episodio" (1 para presencia de episodio y 0 en caso contrario) y posteriormente la variable dummy "Alerta" (días de alerta roja y días de alerta naranja tomando como categoría de referencia los días sin ningún tipo de alerta).

### 3.2.6 IDENTIFICACIÓN DE EVENTOS Y CASOS

Para la identificación de los casos de enfermedad por eventos centinela agudos se realizó la distinción entre "caso" y "evento" de un evento centinela específico. Así, asumiendo como ventana temporal de análisis aquella definida por los periodos de transmisibilidad<sup>4</sup> de cada evento centinela, se definió como "caso" al primer registro observado asociado a un individuo y como "evento", a todos los registros observados posteriores cuya fecha de ocurrencia estuviera dentro del periodo de transmisibilidad. De este modo, elementos descriptivos de la Historia Natural de la Enfermedad constituyeron una estrategia útil para evitar la sobre-estimación de los casos.

Por otro lado, la validación y estandarización de los registros de atenciones en salud durante la valoración de su calidad, permitió controlar la presencia de sesgos de información. Los criterios de calidad del dato esenciales para ello fueron: totalidad, fiabilidad y contenido.

---

4 Periodo de transmisibilidad: En epidemiología se define como el lapso de tiempo durante el cual el agente infeccioso o huésped puede ser transferido directa o indirectamente de una persona infectada a otra, de un animal infectado a una persona o de una persona infectada a un animal, incluyendo los vectores (Diccionario académico de la medicina, 2013).



## 3.2.7 RECURSOS INFORMÁTICOS

La captación y almacenamiento de los datos, así como la implementación de los modelos relacionales, se realizó utilizando el software gestor de base de datos PostgreSQL 9.6.2. Para el análisis de datos se utilizaron los paquetes estadísticos R versión 3.4.4 y SPSS versión 24. El proceso de construcción de los GAM se realizó mediante el paquete mgcv de R. El procesador de texto y tablas utilizado fue Microsoft office 2015. Los softwares comerciales contaron con licencia para uso general de la Universidad de Antioquia.

## 3.2.8 CONSIDERACIONES ÉTICAS

Este estudio fue avalado por el Comité de Ética de la Investigación de la Facultad Nacional de Salud Pública, catalogándolo como sin riesgo según la resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud y no requería consentimiento informado. Esto de acuerdo al acta de la sesión 157 del 26 de enero de 2017.

Adicionalmente, el estudio aseguró a través de acuerdos de confidencialidad y no divulgación de información pública, clasificada y reservada con la Secretaria Seccional de Salud y Protección Social de Antioquia, el compromiso de mantener los datos entregados bajo reserva, refiriéndose principalmente a los RIPS. Los soportes de verificación de los avales y acuerdos mencionados, se pueden consultar en el anexo 6.

## 3.3 RESULTADOS

### 3.3.1 MORBILIDAD POR EVENTOS CENTINELA ASOCIADA A LOS CONTAMINANTES $PM_{10}$ , $PM_{2.5}$ Y $O_3$

En el periodo de análisis 2008-2015, fue necesario establecer un panorama que describiera los principales indicadores de la morbilidad y mortalidad en los eventos centinela que se estudiaron. Para la morbilidad se tuvieron en cuenta los datos de las instituciones prestadoras de servicios de salud del Valle de Aburrá; estas registraron 42.411.665 atenciones en salud en general, distribuidas en los servicios de hospitalización, consulta externa y urgencias. El municipio de Medellín registró el 72.4 %, en contraste con los municipios de Itagüí, Bello, Envigado y Copacabana quienes aportaron el 20% de la morbilidad registrada.

El 8,2% (3.487.304) del total de las atenciones registradas en el AMVA, correspondieron a atenciones por los eventos centinela seleccionados, en estos se observó que predominaron en Medellín con un 72.5% seguido de los municipios de Itagüí, Envigado y Bello, los cuales registraron en conjunto el 17,4% de los casos. La Estrella fue el municipio que registró el menor número de casos con un 1.2%. **(Tabla 17).**





**Tabla 17.** Distribución de los eventos centinela por municipio: AMVA, 2008-2015

Municipio	Frecuencia	%
Medellín	2.528.376	72,5
Itagüí	214.776	6,2
Envigado	202.843	5,8
Bello	189.207	5,4
Caldas	73.758	2,1
Copacabana	69.957	2
Sabaneta	56.584	1,6
Barbosa	54.294	1,6
Girardota	53.967	1,5
Estrella	43.542	1,2
Total	3.487.304	100

Los eventos predominantes fueron los relacionados con las infecciones agudas de las vías respiratorias superiores (53,87%) y las enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores (23,74%). En el año 2015 se presentó el mayor número de eventos centinela con un promedio de 1.883 casos diarios en el AMVA, y el menor promedio en el año 2008 registrando 474 casos diarios de eventos centinela; desde el año 2012 se superó el promedio de casos del periodo (de 1.194).

En general, se observó que las atenciones en salud se incrementaron progresivamente a lo largo del periodo de estudio, evidenciando un aumento en el número de casos, condición que se debe no solamente al incremento de la morbilidad dado por su comportamiento epidemiológico sino al aumento en el registro por las IPS.

Después de obtener un panorama general de la morbilidad por eventos centinela, se expone a continuación la morbilidad dada por dichos eventos (respiratorios y circulatorios) asociados a los contaminantes en estudio; esta relación entre la morbilidad y los contaminantes fue analizada teniendo en cuenta el incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la concentración de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{O}_3$ , específicamente en los resultados derivados de los modelos GAM. En todos los análisis se enfatizó en la interpretación de indicador de rezago<sup>5</sup> acumulado de 0 hasta 15 días (0-15) del contaminante, y rezago puntual y en algunos eventos para específicos grupos de edad.

<sup>5</sup> La definición de rezago, se encuentra explícita en el apartado de metodología.



## Enfermedad respiratoria asociada al contaminante PM<sub>10</sub>

En un efecto acumulado de 15 días (rezago 0-15), los municipios que presentaron el más alto porcentaje en el riesgo de presentar enfermedad respiratoria en los menores de 5 años, por el incremento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub>, fueron Copacabana con un 33,8%, Bello con un 33,5% y La Estrella con 33,1%, los demás municipios presentaron porcentajes menores, y en el caso del municipio de Envigado los datos no fueron suficientes para ajustar un modelo. Sin embargo, para este municipio, en el grupo poblacional de hombres con 65 años y más, se encontró un incremento de 3,5% en el riesgo de enfermedad respiratoria por cada aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en la concentración del contaminante, ajustado por las demás variables incluidas en el modelo (**Tabla 18**).

## Enfermedad respiratoria asociada al contaminante PM<sub>2,5</sub>

En un efecto acumulado de 15 días (rezago 0-15), la población infantil menor de 5 años presentó la mayor asociación de enfermedad respiratoria y PM<sub>2,5</sub>. Los porcentajes más altos de incremento en el riesgo se presentaron en los municipios de Envigado con un 43,3% del incremento por aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en la concentración del contaminante, seguido de Girardota con un 37,2% y Caldas con 29,6%, manteniendo los demás factores constantes.

El menor porcentaje de incremento del riesgo de presentar enfermedad respiratoria por un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>2,5</sub>, se presentó en los municipios de Medellín con 25,2% e Itagüí con un 14,4%, mientras que Barbosa, Bello, Copacabana, La Estrella y Sabaneta no presentaron asociaciones, con el desenlace, en el grupo de edad estudiado.

En el caso de los hombres de 65 años y más, como se puede observar en la **Tabla 18**, los excesos de riesgo fueron del 19,9% y 2% en los municipios de Envigado e Itagüí respectivamente, en el número de casos de enfermedad respiratoria por cada de incremento de 10 µg/m<sup>3</sup>. En el contaminante

## Enfermedad respiratoria asociada al contaminante O<sub>3</sub>

La relación entre el O<sub>3</sub> y la enfermedad respiratoria en un acumulado de 15 días de exposición (rezago 0-15) se evidenció únicamente en los municipios de Medellín, Caldas, Envigado e Itagüí (**Tabla 18**).

En Medellín se presentaron asociaciones para diferentes grupos poblacionales, en primer lugar para la población menor de 5 años, se encontró un incremento del 8,3% en el riesgo para el evento estudiado. En segundo lugar, se encontraron incrementos de 1% y 1.6% en el riesgo de enfermedad respiratoria debido a un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en la concentración del contaminante en los grupos de hombres y mujeres de 65 años y más respectivamente (**Tabla 18**).

En el municipio de Caldas se encontró un incremento de 0,91% en el riesgo, mientras que el mayor porcentaje entre los tres municipios para el rezago estudiado se encontró en Envigado con un valor de 38,8% de incremento en el riesgo por enfermedad respiratoria en menores 5 años, debido a un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en la concentración de O<sub>3</sub>. El municipio de Itagüí, a diferencia de los tres anteriores, presentó un incremento de 2.0% en el riesgo de enfermedad respiratoria en los hombres de 65 años y más (**Tabla 18**).



En la **Tabla 18** se resumen todos los hallazgos presentados en morbilidad respiratoria para el rezago 0-15 en todos los municipios. La información obtenida para otros rezagos y eventos se puede consultar en las tablas y gráficos incluidas en los anexos 7 y 8.

**Tabla 18.** Magnitud del riesgo para enfermedad respiratoria, asociada al incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el promedio diario de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  y  $\text{O}_3$ , por municipios de AMVA 2008-2015 (rezago 0-15)

Municipio	Población	$\text{PM}_{10}$		$\text{PM}_{2.5}$		$\text{O}_3$	
		e $\beta$ (IC)*	% incremento del riesgo **	e $\beta$ (IC)	% incremento del riesgo	e $\beta$ (IC)	% incremento del riesgo
Medellín	Menores de 5 años	1.13 (1.06;1.2)	13	1.183 (1.09;1.29)	18,3	1.083 (1.06;1.1)	8,3
	Hombres de 65 o más años	SA		1.277 (0,94;1,74)	27,7	1.01 (0,98;1,04)	1.0
	Mujeres de 65 o más años	1.004 (0,95;1,06)	0,4	1.126 (1,04;1,21)	12,6	1.016 (0,99;1,04)	1.6
Barbosa	Menores de 5 años	1.217 (0,1;14,41)	21,7	SA		1.155 (0,89;1,5)	15,5
	Hombres de 65 o más años	1.018 (0,63;1,65)	1,8	SA		SA	
Bello	Menores de 5 años	1.335 (1,15;1,55)	33,5	SA		SA	
Caldas	Menores de 5 años	1.231 (0,92;1,64)	23,1	1.296 (0,98;1,72)	29,6	1.072 (0,99;1,16)	7,2
Copacabana	Menores de 5 años	1.338 (1,13;1,59)	33,8	SA		SA	
Envigado	Menores de 5 años	SA		1.433 (0,83;2,47)	43,3	1.388 (1,01;1,9)	38,8
	Hombres de 65 o más años	1.035 (0,87;1,24)	3,5	1.199 (0,74;1,96)	19,9	SA	
Girardota	Menores de 5 años	1.062 (0,81;1,39)	6,2	1.372 (0,28;6,72)	37,2	SA	
Itagüí	Menores de 5 años	1.225 (1,02;1,48)	22,5	1.144 (0,88;1,49)	14,4	1.123 (1,07;1,18)	12,3
	Hombres de 65 o más años	SA		1.02 (0,85;1,22)	2	1.016 (0,92;1,12)	1.6
La Estrella	Menores de 5 años	1.331 (1,13;1,57)	33,1	1.252 (0,95;1,65)	25,2	SA	
Sabaneta	Menores de 5 años	1.04 (0,77;1,4)	4	SA		SA	
	Mujeres de 65 o más años	1.039 (0,71;1,51)	3,9	SA		SA	

SA: Sin ajuste óptimo del modelo

\* e $\beta$  (IC): exponente de beta (intervalo de confianza del 95% para la asociación)

\*\* % incremento del riesgo: corresponde al %e $\beta$ .



## Enfermedad circulatoria asociada a los contaminantes PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>

La relación entre eventos de tipo circulatorios y los cambios en el promedio diario de los contaminantes aplicó únicamente para el Municipio de Medellín con los contaminantes PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub>. Teniendo en cuenta una exposición acumulada de 0 a 15 días, para el contaminante PM<sub>2.5</sub> se encontró asociación tanto en hombres como en mujeres de 65 años y más años, presentándose un incremento de 29,7% y 27,7% en el riesgo debido a un aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en el contaminante respectivamente.

En el caso del O<sub>3</sub>, se encontró asociación tanto en hombres como en mujeres de 65 y más años, evidenciando un incremento de 8,3% y 9,5% del número de casos debido al aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en el contaminante respectivamente, lo anterior también tomando en cuenta una exposición acumulada de 0 a 15 días.

La **Tabla 19** presenta la asociación en términos del porcentaje de incremento en el número de casos de la enfermedad circulatoria por aumento de 10 µg/m<sup>3</sup> en O<sub>3</sub> y PM<sub>2.5</sub> para el municipio de Medellín, en las poblaciones donde se encontró dicha relación.

**Tabla 19.** Magnitud del riesgo para enfermedad circulatoria, asociada a de 10 µg/m<sup>3</sup> en el promedio diario de PM<sub>2.5</sub> y O<sub>3</sub> por grupos poblacionales, Medellín 2008-2015 (rezago 0-15)

Población	PM <sub>2.5</sub>		O <sub>3</sub>	
	eβ (IC)*	% incremento del riesgo **	eβ (IC)	% incremento del riesgo
Hombres de 65 o más años	1.297 (1,1;1,53)	29,7	1.083 (1,1;1,17)	8,3
Mujeres de 65 o más años	1.277 (0,98;1,66)	27,7	1.095 (1,1;1,2)	9,5

\* eβ (IC): exponente de beta (intervalo de confianza del 95% para la asociación)

\*\*% incremento del riesgo: corresponde al %eβ.

SA: Sin ajuste óptimo del modelo

## 3.3.2 MORTALIDAD POR LOS EVENTOS CENTINELA ASOCIADA A LOS CONTAMINANTES PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> Y O<sub>3</sub>

Las defunciones totales en los 10 municipios durante el periodo de estudio fueron 149.607, las cuales se concentraron en el municipio de Medellín con el 71%, en Bello, Envigado e Itagüí fueron del 7% aproximadamente. Con respecto a los casos registrados de las defunciones por los eventos centinela se identificaron 46.525 muertes que representaron el 31% del total registrado en el período de estudio, nuevamente Medellín concentró la mayor proporción de casos con el 69% y conjuntamente con Bello, Itagüí y Envigado aportaron el 91% (**Tabla 20**). En promedio por año, se presentaron 5.816 defunciones, donde en el año 2015 se observó la frecuencia más elevada con un incremento del 13% sobre el promedio del periodo.





**Tabla 20.** Defunciones por eventos centinela y peso relativo respecto al total de defunciones por municipio. Municipios del AMVA. 2008 – 2015.

Municipio	n**	%	N**	n/N***
Medellín	31.912	68,6	104.757	30,5
Bello	4.311	9,3	13.879	31,1
Itagüí	3.126	6,7	9.794	31,9
Envigado	2.756	5,9	7.793	35,4
Caldas	1.025	2,2	3.123	32,8
Copacabana	882	1,9	2.556	34,5
La Estrella	812	1,7	2.286	35,5
Barbosa	600	1,3	1.915	31,3
Girardota	558	1,2	1.882	29,6
Sabaneta	544	1,2	1.622	33,5
Total	46.525	100,0	149.607	31,1

\*n: número de defunciones por eventos centinela

\*\*N: número total de muertes por todas las causas

\*\*\*n/N: Relación entre muertes por eventos centinela y total de muertes por todas las causas

Las defunciones ocasionadas por enfermedades del aparato circulatorio y respiratorio, fueron los eventos centinela seleccionados, en una relación aproximada de 2 defunciones por enfermedades del sistema circulatorio por una defunción debida al sistema respiratorio (65% vs 35%, respectivamente).

La tasa ajustada de mortalidad para los eventos por enfermedades del sistema circulatorio durante el mismo periodo de tiempo presentó valores más elevados, comparado con la tasa de mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio, fluctuando entre 84,4 defunciones por cada cien mil habitantes (como valor mínimo en el año 2013) y 94 defunciones por cada cien mil habitantes como valor máximo en el año 2010; la tasa ajustada de mortalidad por enfermedades del sistema respiratorio para el municipio de Medellín, varió entre 41,5 y 50 muertes por cada cien mil habitantes.

Se destacó que, en la mortalidad prematura expresada en los Años de Vida Potencialmente Perdidos (APVP), se presentó una pérdida total de 257.429 años potenciales de vida a causa de los eventos centinela relacionados con la contaminación del aire en AMVA, con un promedio de 32.179 APVP por año, lo que representó una tasa del periodo de 890 APVP por cada cien mil habitantes; el 41% de los APVP los aportaron las muertes prematuras acaecidas entre los años 2008 y 2010.

En relación con los eventos centinela, el 65,7% de los APVP por la población del AMVA durante los ocho años fueron a causa de enfermedades del sistema circulatorio, y cuando se consideró el municipio, la mayor pérdida de APVP se presentó en Barbosa con 3.744 años de vida por cada 100.000 habitantes.

En cuanto al análisis de asociación de la mortalidad con las concentraciones de los contaminantes estudiados, los datos obtenidos permitieron sustentar dicha asociación para el municipio de Medellín; por lo tanto, los resultados de los modelos explicativos que se exponen a continuación,



fueron aquellos cuyo coeficiente de rezagos acumulados, en este caso de 0 a 7 días, fueron plausibles desde el punto de vista estadístico y epidemiológico.

En general, los porcentajes de incremento en las muertes por cada  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de exposición a  $\text{PM}_{10}$  fueron de 0,5% por todos los eventos centinela en todas las edades, de 0,6% igualmente por todos los eventos, pero en la población de 65 años y más y de 0,3% en esta última población debido a enfermedad respiratoria.

Se destacó un incremento del 2.1% en el número de muertes por enfermedad respiratoria en todas las edades, asociadas con un incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del contaminante  $\text{PM}_{10}$  igualmente en el rezago 0-7. También se reportó un incremento de 1.4% en las muertes por todos los eventos centinela en las personas menores de 65 años de edad. La mortalidad por enfermedad circulatoria únicamente fue asociada con un incremento de 1.2% en el número de muertes por esta causa en la población menor de 65 años.

La **Tabla 21** presenta la magnitud del número de muertes por todos los eventos centinela y todas las causas, asociadas a un incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de los contaminantes  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{O}_3$  en el municipio de Medellín, para un rezago de 0 a 7 días. Al igual que en la morbilidad, otros rezagos y eventos encontrados en los modelos desarrollados, se encuentran resumidos en tablas y gráficos dentro de los anexos 7 y 8.

Respecto a los demás contaminantes, según los datos reportados por la **Tabla 21**, un aumento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del  $\text{O}_3$  se asoció a un incremento de 0,3% en el riesgo de muerte por todos los eventos en todas las edades. Por otro lado, un incremento igual en el contaminante  $\text{PM}_{2,5}$  reportó un aumento de 0,4% del riesgo de muerte por todos los eventos en la población de 65 años y más.

**Tabla 21.** Magnitud del riesgo de muertes por eventos centinela asociado al incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el promedio diario de  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{O}_3$ , Medellín 2008-2016 (rezagos 0-7)

Contaminante	Edad	Evento centinela					
		Respiratoria		Circulatoria		Todos los eventos	
		eβ (IC)**	% incremento del riesgo ***	eβ (IC)	% incremento del riesgo	eβ (IC)	% incremento del riesgo
$\text{PM}_{10}$	65 o más años	1.00294 (0,989;1.017)	0,3	1.0085 (0,999; 1.019)	0,8	1.0057 (0,996;1.015)	0,6
	Menores de 65	1.010087 (0,998;1.022)	1.0	1.0116 (0,994;1.029)	1.2	1.0026 (0,996;1.009)	0,3
	Todas	1.021292 (1.004;1.039)	2.1	SA		1.0045 (0,993 ;1.016)	0,5
$\text{PM}_{2,5}$	65 o más años	SA		1.0035 (0,989;1.018)	0,3	1.0040 (0,987;1.022)	0,4
	Todas	SA		SA		1.0021 (0,980;1.024)	0,2
$\text{O}_3$	65 o más años	SA		1.0076 (1.003;1.013)	0,8	1.0037 (0,997;1.010)	0,3
	Menores de 65	SA		1.0092 (1.004;1.0142)	0,9	SA	
	Todas	1.0027 (0,995;1.015)	0,3	1.0041 (0,999;1.009)	0,4	1.0026 (0,996;1.009)	0,3

\* eβ(IC): exponente de beta (intervalo de confianza del 95% para la asociación)

\*\* % incremento del riesgo: %eβ.





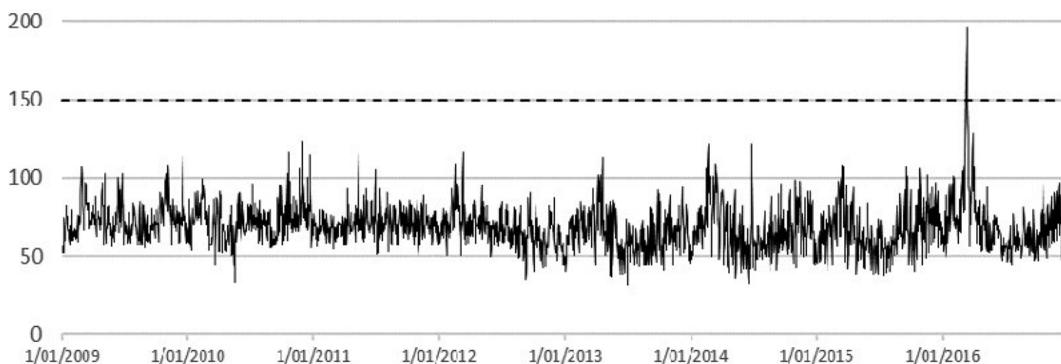
### 3.3.3 EFECTOS EN LA SALUD ASOCIADOS A EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN EN EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ, 2015-2016.

En el periodo de estudio se identificaron momentos específicos de contaminación con características particulares que pudieran asimilarse a episodios de contaminación. En el AMVA se registraron episodios de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en los municipios de Medellín y Girardota en el periodo 2008-2016. En Medellín se identificó un episodio de  $PM_{10}$  que se extendió desde el 9 al 14 de marzo de 2016. En este mismo año la ciudad padeció dos episodios consecutivos de  $PM_{2.5}$ ; el primero de ellos desde el 8 al 17 de marzo y el segundo desde el 27 al 30 del mismo mes. Para el año 2015, Medellín ya había registrado dos episodios del mismo contaminante  $PM_{2.5}$ : del 15 al 18 de marzo y del 25 al 28 del mismo mes.

La Figura 18 deja ver los picos en las concentraciones de  $PM_{10}$  durante los días de episodios de 2016 en Medellín, con niveles máximo de  $196,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un promedio de  $175,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , significativamente por encima de los promedios observados en la semana previa ( $108,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la semana posterior ( $99,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Para el caso de  $PM_{2.5}$  que se observa en la **Figura 19**, se identificaron dos episodios en la ciudad de Medellín; el primero de ellos fue no sólo más extenso sino también más grave en cuanto a las altas concentraciones alcanzadas por este contaminante. Con una cota de  $123,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , este primer episodio superó ampliamente el máximo nivel registrado por este contaminante durante el segundo episodio ( $94,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

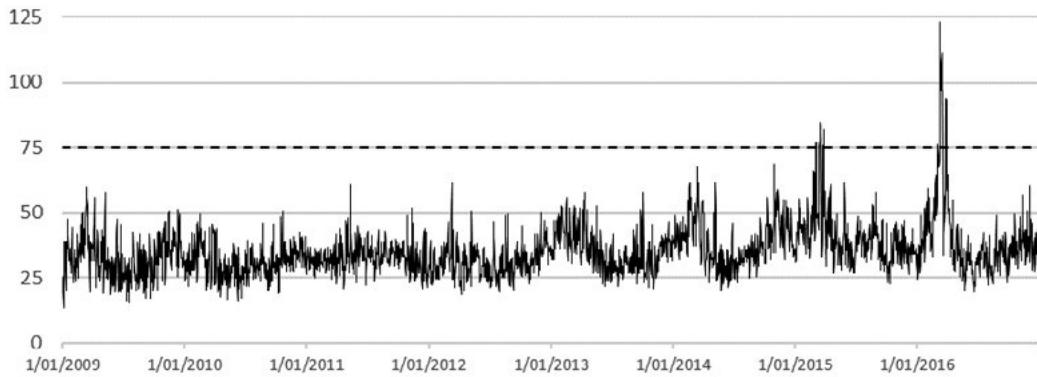
**Figura 18.** Evolución de los niveles de concentración diaria de  $PM_{10}$  en Medellín, 2015-2016



\*Las concentraciones se miden en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



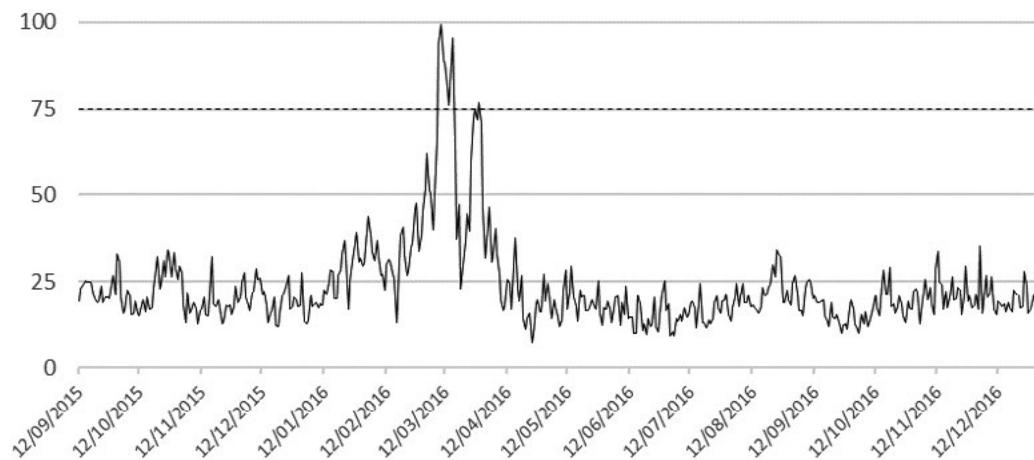
**Figura 19.** Evolución de los niveles de concentración diaria de  $PM_{2.5}$  en Medellín, 2015-2016



\*Las concentraciones se miden en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

En el municipio de Girardota sólo se identificó un episodio de  $PM_{2.5}$  ocurrido entre el 9 y 16 de marzo de 2016. El promedio diario de  $PM_{2.5}$  durante los 8 días de este episodio fue de  $88,9\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sensiblemente superior a los  $53,2\mu\text{g}/\text{m}^3$  de los siete días previos y los  $40,3\mu\text{g}/\text{m}^3$  de los siete días posteriores a dicho evento (**Figura 20**).

**Figura 20.** Evolución de los niveles de concentración diaria de  $PM_{2.5}$  en Girardota, 2015-2016



\*Las concentraciones se miden en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



## Efectos en la salud de los episodios de contaminación

Para Girardota no se detectó efecto adverso en salud asociado al episodio de  $PM_{2.5}$  de 2016, lo cual no descarta que tal efecto no se hubiera dado, debido a que la ausencia del mismo probablemente esté asociada a las bajas frecuencias y/o sub-registros de los eventos diarios en salud analizados en dicho municipio, cuya población total no supera los 57.000 habitantes.

Para Medellín, con información consolidada de 2015, se logró documentar efectos adversos de  $PM_{2.5}$  sobre servicios de urgencias por infección respiratoria y por neumonía en menores de 5 años. Para la ventana de observación del trimestre febrero-abril, en ambos eventos se registraron los mayores efectos desde el primer día de exposición, con incrementos en el riesgo de la atención de urgencias de 4,6% y 6,1% por aumento de  $10 \mu g/m^3$  en  $PM_{2.5}$ . La exposición acumulada de siete días reportó variaciones de 6,2% y 4,6% respectivamente (**Tabla 22**).

Para el mismo aumento de  $PM_{2.5}$ , según lo reportado en la **Tabla 22**, los riesgos de ser diagnosticados por esas dos enfermedades (infección respiratoria y neumonía) en menores de 5 años también reportaron los mayores incrementos desde el primer día de exposición, con variaciones de 3,3% en los correspondientes a infección respiratoria y de 5,5% en los de neumonía. Para el rezago distribuido de 0 a 7 días las variaciones en ambas enfermedades alcanzaron el 6,7%.

**Tabla 22.** Riesgo de urgencias y de diagnósticos de enfermedades respiratorias y circulatorias asociado al incremento de  $10 \mu g/m^3$  en el promedio diario de  $PM_{2.5}$  durante los días de episodios en Medellín, 2015

Eventos	Rezago único 0 días			Rezago distribuido 0-7 días		
	e $\beta$	IC95%	% incremento del riesgo	e $\beta$	IC95%	% incremento del riesgo
Urgencias por IRA menores de 5 años	1.004	1.002-1.007	4,6	1.006	0,998-1.024	6,2
Urgencias por neumonía menores de 5 años	1.006	1.000-1.013	6,1	1.004	0,689-1.023	4,6
Diagnóstico de IRA menores de 5 años	1.003	1.002-1.004	3,3	1.007	1.004-1.009	6,7
Diagnóstico de neumonía menores de 5 años	1.005	1.002-1.009	5,5	1.006	1.003-1.010	6,7
Diagnóstico de asma menores de 5 años	1.001	0,999-1.004	1,3	1.004	1.002-1.007	4,4
Diagnóstico de IAM 65 o más años	1.001	0,996-1.007	1,4	1.006	1.003-1.009	6,6

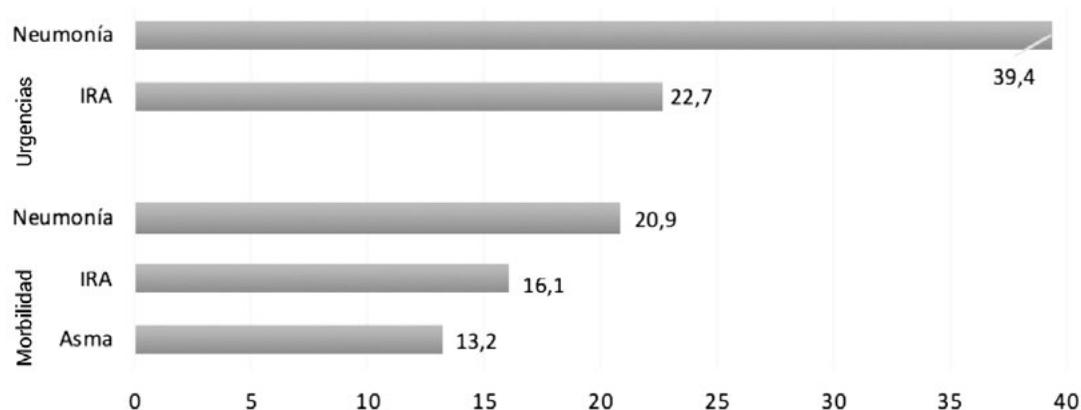
IRA: Infección respiratoria aguda

IAM: Infarto agudo de miocardio

La **Figura 21** muestra los porcentajes de excesos de morbilidad en los días de episodios atmosféricos comparados con los días en que no se presentaron dichos eventos. Con excepción del infarto agudo de miocardio en mayores de 65 años, en todos los eventos de interés se obtuvieron resultados significativos. Se destacaron las urgencias por neumonía en menores de 5 años, con un exceso del 39,4%, seguido de urgencias por infección respiratoria en menores de 5 años con excesos de 22.7%.



**Figura 21.** Porcentaje de excesos de riesgo de morbilidad durante los días de episodios de  $PM_{2,5}$ , Medellín, 2015



Los episodios de  $PM_{2,5}$  ocurridos en 2015 en la ciudad de Medellín, incrementaron desde el primer día de exposición las defunciones por causas respiratorias en la población general y en los adultos con 65 o más años. En la ventana de observación del trimestre febrero-abril, durante el primer día de exposición, el incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $PM_{2,5}$  se asoció con un aumento de 5,7% y 2,4% en las defunciones en el primer y segundo grupo de edad respectivamente. Luego de una exposición acumulada de 7 días, los aumentos de las defunciones por las causas ya señaladas alcanzaron 6,9% en la población general y 6,1% en adultos con 65 o más años

Por tratarse de resultados de interés, se presentan los porcentajes de excesos en los riesgos de morbilidad en los días de alerta naranja y roja. Las alertas en el Valle de Aburrá se refieren a una forma de identificar las alarmas que se generan por excesos de concentración de los contaminantes definidos como críticos; estas se presentan en la **Tabla 23**.

**Tabla 23.** Niveles de alertas según Acuerdo Metropolitano No 15 de 2016-AMVA

Contaminante ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Alerta naranja	Alerta roja FI y FII*	Emergencia
$PM_{10}$ -24 horas	155 – 254	255 – 354	Igual o mayor a 355
$PM_{2,5}$ -24 horas	35,5 – 55,4	55,5 – 150,4	Igual o mayor a 150,5
$O_3$ -1 hora	246 – 323	324 – 401	Igual o mayor a 402

\*Los valores incluyen las dos fases de alerta: Fase I y Fase II (FI y FII)

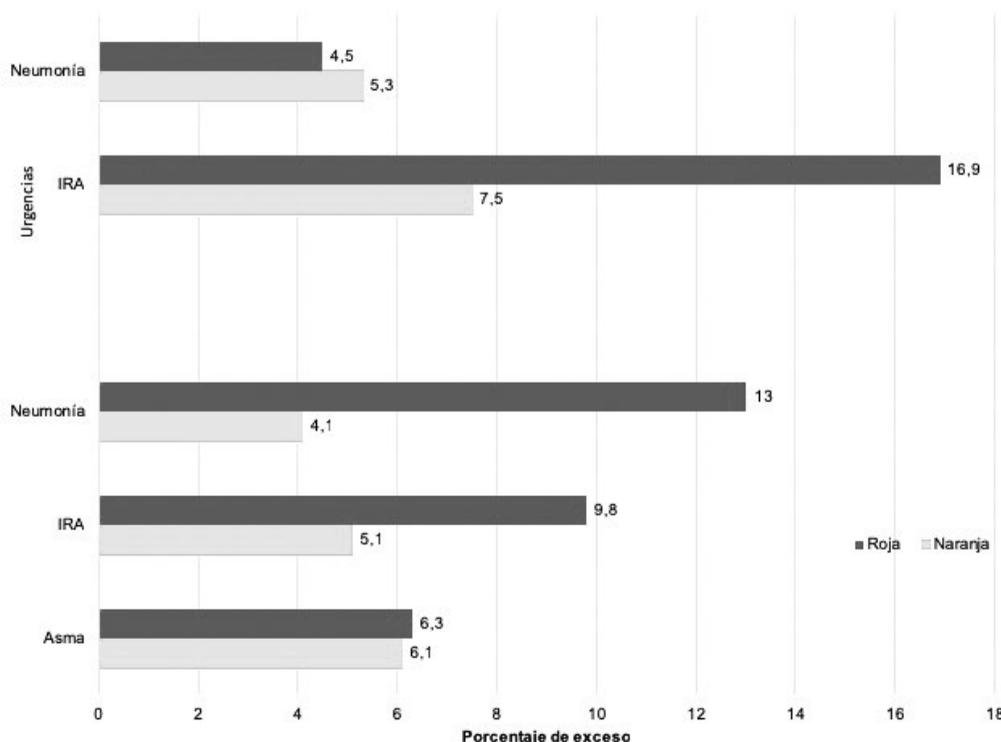
A partir de estas características de los episodios se identificó un orden de magnitudes sobre los porcentajes de excesos en morbilidad y servicios de urgencias registrados en los días de alerta naranja y alerta roja durante los episodios de  $PM_{2,5}$  en Medellín en el año 2015, es decir los días en que las concentraciones diarias de  $PM_{2,5}$  alcanzaron niveles de 35,5 a 55,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y de 55,5 a 150,4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .





Según lo establecido en la **Figura 22**, para el año 2015 de no haberse presentado la alerta naranja, la ciudad se hubiera evitado 5,3% de los casos de urgencias por neumonía y 7,5% de urgencias por infección respiratoria aguda (IRA). Así mismo el control de los días de alerta roja habría evitado respectivamente el 4,5% y 16,9% de estos casos de urgencias. El impacto también es evidente en los diagnósticos de neumonía, IRA y asma: con el control de los días de alerta naranja se habrían evitado entre 4% y 6% casos en dichas enfermedades. Con el control de los días de alerta roja los efectos hubieran sido mayores, con ahorros del 13% en los casos de neumonía, 9,8% en los casos de IRA y 6,3% en los casos de asma.

**Figura 22.** . Porcentaje de excesos en los riesgos de morbilidad durante los periodos de alerta roja y alerta naranja, Medellín, 2015



En cuanto a los eventos circulatorios, en la **Tabla 24** se presentan los resultados para los diagnósticos de infarto agudo de miocardio (IAM) en mayores de 65 años. En este caso la asociación con  $PM_{2.5}$  inició en niveles relativamente bajos y estadísticamente no significativos, pero con una tendencia creciente en los días posteriores de rezago único. De manera significativa, la exposición acumulada de 7 días mostró un aumento del 6,6% en el riesgo de esta enfermedad por un incremento de  $10 \mu g/m^3$  en  $PM_{2.5}$ .

Para el lector interesado en profundizar en el estudio de los episodios atmosféricos, en el anexo 9 se detallan los resultados obtenidos en dicho análisis.



**Tabla 24.** Riesgo de infarto Agudo de Miocardio (IAM) en población de 65 o más años, por aumento diario de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{2.5}$  durante los episodios de Medellín, 2015

Rezagos	Riesgo de Diagnósticos de IAM por aumento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en $\text{PM}_{2.5}$		
	$e\beta$	IC95%	% incremento del riesgo
Lag 0	1.001	0,996-1.007	1.4
Lag 1	1.001	0,996-1.007	1.1
Lag 2	1.000	0,995-1.006	1.0
Lag 3	1.003	0,997-1.008	2.9
Lag 0:3	1.003	0,994-1.011	2.6
Lag 0:7	1.006	1.003-1.009	6,6
Lag 0:15	1.001	0,969-1.035	1.2





## 3.4 CONCLUSIONES

El estudio abordó un diseño ecológico de series de tiempo para explicar la relación entre la exposición a los contaminantes atmosféricos  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $O_3$  con la morbi-mortalidad por eventos centinela en cada uno de los municipios del Valle de Aburrá, para el periodo 2008-2016. Es la primera investigación en el país con un alcance de esta magnitud en términos del período de tiempo (10 años) y la población (10 municipios) analizados; así mismo para el Valle de Aburrá se convierte en la primera investigación en el área de la epidemiología de la salud ambiental frente al tema de calidad del aire y salud.

Las técnicas empleadas en la investigación consideraron innovaciones metodológicas en el desarrollo de cada uno de sus componentes tomando como eje fundamental la calidad de los datos. Entre las técnicas análticas utilizadas se destacan la imputación de datos a través de diferentes técnicas, para reemplazar de manera adecuada los datos faltantes en las series que describían las concentraciones de los contaminantes, la combinación de series de datos ambientales para construir una serie representativa para cada municipio que pudiera ser relacionada con los eventos de salud estudiados.

Se realizó una exhaustiva revisión de los datos de salud, especialmente aquellos correspondientes a la morbilidad, suministrados por los RIPS. Con esta fuente de información, se aplicaron diferentes recursos informáticos para identificar casos a partir de los registros de información, de eventos, y de esta forma lograr una descripción más real de la morbilidad, para mayor veracidad en la información. La investigación consideró de gran importancia la adecuada selección de los eventos centinela de salud, para lo cual se aplicaron diferentes estrategias de caracterización de la enfermedad como la revisión de evidencias clínicas y epidemiológicas, y el modelo descriptivo denominado historia natural de la enfermedad, lo que permitió determinar, de manera sustentada, la selección de enfermedades del sistema respiratorio y circulatorio como los eventos centinela a estudiar en relación con la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá.

Se estableció la relación entre la calidad del aire y los eventos centinela en salud, relacionados con la morbilidad y la mortalidad, que se justificó técnicamente en los resultados arrojados por los modelos aditivos generalizados, GAM, para la ventana de observación de los años 2008 al 2015, en el análisis de los casos de morbilidad y de 2008 a 2016, para las defunciones por eventos centinela, en el AMVA; se destacó que la contaminación del aire tuvo efectos negativos en la salud de la población, expresada por el riesgo de presentación diaria de las enfermedades respiratorias y circulatorias, tanto a nivel de casos de enfermedad como a la ocurrencia de defunciones. Con retardos distribuidos de 15 días, sólo el  $PM_{10}$  tuvo efectos en la enfermedad respiratoria en todos los municipios del AMVA.

El  $PM_{10}$  tuvo efectos en los casos de enfermedad respiratoria en todos los municipios del AMVA. El incremento de  $10 \mu g / m^3$  en este material particulado aumentó el riesgo de enfermedad respiratoria en un máximo de 33,8% en menores de 5 años en Copacabana y un mínimo de 0,4% en mujeres con 65 o más años de Medellín. Con excepción de Envigado, en todos los diez municipios del AMVA los menores de 5 años emergen como el grupo de población más vulnerable a enfermedad respiratoria asociada a los incrementos de este contaminante, y el menor incremento en el riesgo de enfermedad respiratoria se presentó en el municipio de Sabaneta con un 4%.

En cuanto al  $PM_{2.5}$  no se encontró evidencia de sus efectos sobre el riesgo de enfermedad respiratoria en los municipios de Barbosa, Bello y Sabaneta. En los demás municipios los efectos sobre esta enfermedad se produjeron fundamentalmente en los menores de 5 años, con variaciones más altas en Envigado con un 43,3% y más bajas en Itagüí con 14,4%.



Los impactos en esta enfermedad derivados de la exposición a  $O_3$  se evidenciaron en cinco de los diez municipios del AMVA, alcanzando en Envigado un máximo en el incremento de riesgo de 38,8% en los casos diarios de enfermedad respiratoria en menores de 5 años y un riesgo mínimo en Caldas de 7,2% en el mismo grupo de edad. Los riesgos de enfermedad circulatoria solo se registraron en población de la tercera edad en la ciudad de Medellín, asociados a variaciones de  $PM_{2,5}$  y ozono, pero no a las variaciones de  $PM_{10}$ .

Para el caso de las defunciones, los efectos de la contaminación parecen concentrarse sólo en el municipio de Medellín. Dicho resultado, sin embargo, no descarta la presencia de efectos similares en el resto de los municipios del AMVA. De hecho, la falta de evidencia derivada de los GAM en esas unidades geográficas pudiera estar relacionada con un efecto puramente estadístico, toda vez que debido a la menor densidad poblacional en dichos municipios se producen bajas frecuencias en las defunciones por todas las causas y por causas específicas.

En Medellín, los tres contaminantes impactaron de manera diferencial la mortalidad por todas las causas (de los eventos centinela seleccionados) en todas las edades. Mientras que por cada incremento de  $10 \mu g / m^3$  en  $PM_{10}$  el riesgo de dichas defunciones aumentaron en 0,5% diarios, incrementos similares en Ozono y  $PM_{2,5}$  estarían asociados a aumentos en el riesgo de mortalidad de 0,3% y 0,2% respectivamente.

Según las causas específicas de las defunciones, en el mismo grupo de todas las edades de la ciudad de Medellín, el efecto de mayor magnitud se produjo en el riesgo de mortalidad por enfermedad respiratoria, con incremento de 2.1% asociado a aumentos diarios de  $10 \mu g / m^3$  en  $PM_{10}$ . Para la población vulnerable con 65 o más años, incrementos similares de  $PM_{10}$  se encontraron asociados a aumentos del riesgo de 0,8% para mortalidad por enfermedad circulatoria y 0,3% en la mortalidad por causa respiratoria. Los aumentos en  $O_3$  produjeron incrementos de 0,8% en el riesgo de defunciones por enfermedad circulatoria en la población de tercera edad.

Como se observó en los resultados presentados, no fue posible realizar en todos los municipios la modelación GAM para los eventos elegidos. Es necesario tener presente que este hecho refleja más la escasez de datos disponible de salud, que la usencia del efecto deletéreo de corto plazo de la contaminación en la población. Para un análisis más preciso es necesario tener una conciencia mayor sobre la utilidad de los datos para la comprensión de fenómenos poblacionales y para la toma de decisiones informadas, por lo tanto, se deben generar las estrategias para una gestión más oportuna de la información.

Para los años 2015 y 2016, en los municipios de Girardota y Medellín se identificaron en los meses de marzo incrementos en el material particulado  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ , que configuraron episodios atmosféricos, los cuales, según la literatura internacional, hacen relación a la presencia durante tres o más días consecutivos de niveles de concentración de contaminantes por encima de tres veces los valores críticos planteados por la OMS.

Para Girardota no se detectó ningún efecto adverso en salud asociado al episodio de  $PM_{2,5}$  de 2016, lo cual como se mencionó anteriormente no descarta que tal efecto no se hubiera dado, debido a que la ausencia del mismo probablemente esté asociada a las bajas frecuencias y/o subregistro de los eventos diarios en salud analizados en dicho municipio, cuya población total no supera los 57.000 habitantes.

Para el año 2015, con información consolidada por instituciones oficiales del sector salud, se logró documentar para Medellín efectos adversos de  $PM_{2,5}$  sobre la consulta a servicios de urgencias por infección respiratoria y por neumonía en menores de 5 años. Para la ventana de observación del trimestre febrero-abril, en ambos eventos se registraron los mayores efectos desde el primer



día de exposición, con incrementos en el riesgo en esas urgencias de 4,6% y 6,1% por aumentos de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{2,5}$ . La exposición acumulada de siete días reporta variaciones de 6,2% y 4,6% respectivamente.

Para igual aumento de  $\text{PM}_{2,5}$ , el riesgo en la presentación estas dos enfermedades en menores de 5 años también reportaron los mayores incrementos desde el primer día de exposición: 3,3% para infección respiratoria y 5,5% para neumonía. Para el rezago distribuido de 0-7 días las variaciones en ambas enfermedades alcanzaron el 6,7%.

Los episodios de  $\text{PM}_{2,5}$  ocurridos en 2015 en la ciudad de Medellín incrementaron, desde el primer día de exposición, el riesgo de defunciones por causas respiratorias en la población general y en los adultos con 65 o más años. En la ventana de observación del trimestre febrero-abril, el incremento de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en  $\text{PM}_{2,5}$  se asoció con un aumento de 5,7% y 2,4% en el riesgo de defunciones en el primero y segundo grupo durante el primer día de exposición. Luego de una exposición acumulada de 7 días, los aumentos de los riesgos de defunción por las causas ya señaladas alcanzaron 6,9% en la población general y 6,1% en adultos con 65 y más años.

Este último resultado es en particular muy relevante en cuanto informa la alta susceptibilidad de una población de tercera edad que eventualmente arrastra enfermedades respiratorias de base como la EPOC, la bronquitis y la neumonía. En dicha población parecen más frecuentes las afecciones respiratorias de vías bajas.

En el caso de la población general, se observó un sensible efecto en defunciones durante el primer día de exposición que se mantuvo relativamente estable luego de los rezagos considerados. No obstante, en el caso de la población de 65 o más años, se observó un gradiente creciente de la magnitud de la medida de asociación luego de la exposición del primer día. Los resultados de Medellín se suman al creciente cuerpo de evidencia que relaciona  $\text{PM}_{2,5}$  con la mortalidad diaria.

En conjunto, en los días de episodios de  $\text{PM}_{2,5}$  durante 2015, comparado con los días del trimestre febrero-abril en los que no se presentó dicho evento, los resultados de este estudio informan excesos de morbilidad y uso de servicios de urgencias en menores de 5 años de la ciudad de Medellín. Mientras que las urgencias por neumonía se incrementaron en 39,4%, las correspondientes a infección respiratoria aumentaron en 22,7%. Los casos de neumonía e infección respiratoria se incrementaron en su orden en 20,9% y 16,15%. En ese mismo grupo de edad también se presentó un exceso de 13,2% en los diagnósticos de asma.

Los resultados que se derivan de esta investigación, sugieren a los tomadores de decisiones en salud pública ambiental redoblar esfuerzos para proteger la salud de la población más vulnerable (menores de 5 y mayores de 65 años), específicamente en los eventos relacionados con las enfermedades respiratorias, mediante campañas masivas que minimicen la exposición prolongada a los contaminantes y acciones específicas para los momentos del año en los que se pronostica la presencia de episodios atmosféricos. También es muy importante que de forma intersectorial se diseñen estrategias educativas que coadyuven a la disminución de los eventos centinela relacionados con la contaminación del aire tales como la socialización a las IPS con mayores volúmenes de atención a los usuarios, de los resultados de esta investigación y la propuesta de acciones que permitan intensificar la vigilancia en salud pública, específicamente en el monitoreo del comportamiento de las principales enfermedades, ante la identificación de aumento de casos inesperados; además, es necesaria la notificación inmediata de los casos de enfermedades y de las defunciones asociadas a la contaminación del aire cuando se presenten.

A pesar del esfuerzo para lograr resultados con la mínima cantidad de sesgos, el estudio presenta algunas limitaciones que es necesario hacer explícitas. La primera limitación se relaciona con la



ausencia de un sistema de información que consolidara en una bodega de datos la información ambiental, meteorológica y de los eventos centinelas. No obstante, con la idoneidad de algunos investigadores con destrezas en el manejo de big data y de técnicas heurísticas, se logró construir una base maestra para el fin del estudio.

Un aspecto a tener en cuenta en la interpretación de resultados del estudio tiene que ver con el hecho de que se asumiera como unidad de análisis las poblaciones de cada municipio y no los individuos; en ese sentido es necesario tener la precaución de no vincular erróneamente lo individual entre la exposición y el efecto. No obstante, el diseño ecológico utilizado permite la toma de decisiones de intervención a nivel municipal y es un punto de partida provechoso para trabajos epidemiológicos más detallados. Con respecto a la información de morbilidad, solo se abordaron los registros que refirieron la demanda atendida, con los RIPS, cuyas principales limitantes estriban en la captación del caso, del registro y la validación del diagnóstico, pero era la información pertinente que exigía el desarrollo de la propuesta; pese al esfuerzo de todos para garantizar la mejor calidad de los datos, no son descartables los sesgos asociados a tales circunstancias.





## RECOMENDACIONES

El estudio logró un avance muy importante en la generación de nuevo conocimiento sobre el fenómeno de salud asociado a la calidad del aire a nivel local, así mismo en el desarrollo de procesos metodológicos innovadores en el abordaje del manejo de datos que ha sido reconocido a nivel internacional y en los procesos analíticos que guiaron la modelación de la relación; todo lo cual demuestra la alta calidad del proceso realizado.

Este proyecto abordó sólo una parte del espectro de salud que ha sido asociado a los contaminantes del aire, relacionada con los eventos agudos que se asocian a la exposición de corto plazo, con exploraciones de la exposición diaria a un solo contaminante en un nivel municipal. Esto invita a iniciar otros procesos investigativos que exploren otros eventos en salud (eventos crónicos) y abordajes complementarios de la exposición, con el fin de tener una comprensión más completa de la relación salud- calidad de aire y poder establecer con mayor grado de precisión sus impactos sociales y económicos para los municipios de la región del Valle de Aburrá, como un insumo fundamental para el diseño de políticas públicas dirigidas a la gestión ambiental y el cuidado de la salud y la vida.

Reconociendo este proceso como punto de partida en la generación e integración de conocimiento de dos campos complejos pero esenciales en el devenir de la región y los municipios que la conforman desde el equipo base de esta investigación, que incluye el equipo de investigación de la Facultad Nacional de Salud Pública y el equipo de apoyo de AMVA que ha acompañado este proceso, nos permitimos realizar las siguientes recomendaciones con el ánimo de impulsar una gestión del conocimiento que permita la articulación intersectorial e interinstitucional para la búsqueda de soluciones de un tema tan crítico y para lo cual hemos priorizado 3 campos de acción: 1) fortalecimiento de políticas y medidas institucionales, 2) fomento de la investigación, y 3) mejoramiento de los sistemas de información.

### **Fortalecimiento de políticas y medidas Institucionales**

Las siguientes recomendaciones están dirigidas principalmente a los tomadores de decisiones que guían las políticas públicas, las estrategias y el desarrollo de las entidades territoriales en las áreas ambiental y de salud:

1) Este proyecto mostró la alta complejidad en el manejo y análisis de datos que es requerida para comprender la relación entre la contaminación del aire y los procesos salud- enfermedad en cada municipio, y para generar información que permita la mejor planificación y generación



de acciones en salud pública a nivel local. Esta realidad contrasta con un escenario de recursos técnicos y tecnológicos y de talento humano con amplias diferencias entre los municipios del Valle de Aburrá, en donde algunos municipios ni siquiera cuentan con personal entrenado para realizar análisis epidemiológicos o realizar la gestión requerida de la información. Por tanto, se recomienda avanzar en el diseño e implementación de un **Sistema Metropolitano de Vigilancia de Salud Ambiental** que permita la gestión adecuada y oportuna de la información ambiental y de salud, que permita la articulación e integración de distintos sectores y que genere periódicamente información para la acción.

2) También se requiere avanzar en la integración de los sistemas de información ambientales y de salud de forma que se logre el análisis oportuno del fenómeno epidemiológico asociado a la contaminación. En tal sentido, es importante consolidar los distintos procesos de gestión de la información con las distintas instituciones y sectores involucrados, así como estructurar una herramienta de tipo tecnológico que permita el almacenamiento y análisis de los grandes volúmenes de datos con los que cuenta la región, que incluya los protocolos y metodologías desarrolladas en este proyecto, para esto se propone establecer bodegas de datos operativas como solución informática.

3) Se recomienda incluir los análisis de salud, en los protocolos de evaluación de los distintos instrumentos de gestión para el mejoramiento de la calidad del aire: Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire-PIGECA y Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica-POECA; y en los instrumentos para la construcción del Sistema de Ordenamiento Territorial del Valle de Aburrá: Plan Estratégico Metropolitano de Ordenamiento Territorial-PEMOT; mediante indicadores de impacto específicos, que permitan establecer la contribución de estas estrategias en el mejoramiento de la salud ambiental y bienestar de los habitantes de la región.

4) Es necesario realizar quinquenalmente el análisis de la situación de los eventos de salud asociados a la exposición de corto plazo, incluidos los análisis de episodios atmosféricos (meses febrero-marzo-abril), como estrategia de generación de información y levantamiento de indicadores necesarios para las evaluaciones de corte de los instrumentos de gestión y las estrategias implementadas.

5) El apoyo a la toma de decisiones informadas debe ser el centro de la motivación para la generación y gestión social del conocimiento a través de distintos proyectos de investigación. Por ello y dada la importante experiencia de gestión de conocimiento de AMVA, se recomienda avanzar en la integración de los diferentes procesos de investigación que se realizan con las distintas instituciones con el ánimo de progresar mancomunadamente en la comprensión cada vez más detallada del comportamiento de la calidad del aire y la salud.

6) Es importante diseñar e implementar estrategias articuladas para la gestión social del conocimiento, y la divulgación y comunicación de estos resultados a públicos y espacios claves, de manera que la información sea conocida y comprendida de forma asertiva, y así mismo las reacciones y acciones frente a la misma. Además, impulsar con actores públicos y gubernamentales, proceso de formación y capacitación técnica y especializada del talento humano en los procesos metodológicos, análisis datos e interpretación de resultados en el tema de calidad del aire y salud.

## Fomento de la investigación

Luego de finalizar este proceso, quedan claras varias de las brechas de conocimientos y metodológicas en este campo interdisciplinario de investigación. Estas recomendaciones están dirigidas a las instituciones de educación superior y centro de investigación, así como las entidades de financiación de ciencia tecnología e innovación a nivel local, regional y nacional:



1) Es necesario realizar la discusión académica continua entre los diferentes grupos e instituciones que abordan o han abordado esta temática con el ánimo de establecer procesos colaborativos para la construcción de una agenda de ciencia, tecnología e innovación, ajustada a las necesidades de conocimiento local.

2) Se debe impulsar los procesos de generación y gestión social del conocimiento entre actores locales de distinta índole: actores gubernamentales, organizaciones sociales y comunitarias y ciudadanía en general, con el objetivo de avanzar en el debate informado sobre esta temática.

3) Avanzar en una agenda de investigación en epidemiología de la calidad del aire, para lo cual se proponen las siguientes temáticas:

I. Exposición de largo plazo y eventos en salud de tipo crónico (cáncer).

II. Efecto de la exposición a múltiples contaminantes, exploración de modelos multicontaminantes.

III. Trazabilidad de eventos centinela entre diferentes sistemas de registro de información en salud que permita determinar con mayor precisión la forma cómo se compartan los eventos de salud a estudiar en la población atendida.

IV. Alternativas de metodologías y de análisis (diseños case-crossover, cohorte y cuasi experimentales, estudios de analítica).

V. Influencia de la contaminación en la Esperanza de Vida, como uno de los indicadores con importantes implicaciones para la salud pública y otros campos como la salud ambiental y asuntos incluso económicos.

VI. Estudios de carga de la enfermedad y muerte asociados a la calidad del aire y costo económico para los municipios del AMVA, incluidas nuevas metodologías como el cálculo del valor estadístico de la vida.

VII. Estudios para avanzar en la comprensión de la exposición a los contaminantes en los procesos metodológicos: medición de la exposición individual, aplicación de modelos para la exposición como los modelos Uso de Regresión de Suelo- Land Use Regression (LUR), y modelaciones de ciudad y de región.

VIII. Estudios en grupos vulnerables (niños, embarazadas, trabajadores y personas que realizan actividades al aire libre), que permitan ir concluyendo asuntos más concretos acerca de la afectación a la salud por causa de la exposición a contaminantes atmosféricos.

IX. Otros eventos en salud no explorados como en el campo de la salud materno-infantil, enfermedades metabólicas y enfermedades mentales.

X. Efectos de la contaminación del aire intramural y salud, de manera que se estudien efectos en contextos no sólo ambientales, sino ocupacionales y residenciales.

4) Se debe avanzar en el análisis de los contaminantes atmosféricos de manera agregada y representativa del Valle de Aburrá, con el fin de tener información general de toda la región, debido a que el análisis ambiental realizado fue por municipio. Al mismo tiempo, también es crucial avanzar en la zonificación más precisa del Valle de Aburrá, para evaluar zonas de mayor interés desde un punto de vista ambiental y epidemiológico.



## Mejoramiento de los sistemas de información

Los desarrollos metodológicos y los análisis de esta investigación son dependientes de una información suficiente y de buena calidad y requirió del diseño de procesos de tratamiento de datos e información. Con esta experiencia se realizan las siguientes recomendaciones a las fuentes de información ambientales y de salud, disponibles en la región y los entes que las administran para avanzar en los análisis de salud ambiental:

- 1) Es necesario completar los datos no disponibles en las series de contaminantes generadas por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del AMVA, con el objetivo de tener información que puede ser utilizada en los análisis epidemiológicos. En este sentido se recomienda introducir métodos de imputación para estimar los valores faltantes, y generar desde la red series de datos que puedan ser utilizados con este objetivo, además realizar proceso de análisis que permitan establecer el grado de incertidumbre de las series generadas.
- 2) Es necesario complementar las fuentes de información de entrada para los modelos de predicción de la distribución de contaminantes, para poder avanzar en el desarrollo de modelos de pequeña escala y mejorar las predicciones, en áreas geográficas pequeñas, lo cual permitirá una mejor georreferenciación de las concentraciones de contaminantes, permitiendo ser una herramienta importante para nuevos abordajes epidemiológicos ( estudios de cohortes o case-crossover) que se puedan desarrollar en la región a futuro, y también permitirá una evaluación más localizadas de las estrategias de control y de la planificación ambiental.
- 3) A las entidades generadoras de Registros Individuales de Prestación de Servicios de Salud, se les recomienda establecer metodologías de estructuración de los datos de salud de los RIPS, para mejorar la calidad y la disponibilidad de dichos registros.
- 4) También se recomienda gestionar con las entidades competentes, estrategias de gestión de la información, que permitan mejorar la oportunidad en la información de los eventos centinela de salud asociados a la calidad del aire, en virtud de poder tener un análisis temporal más coherente, y que permita la evaluación de las estrategias de mejoramiento de la calidad del aire de corto plazo y que contribuya a una mejor oportunidad en la vigilancia de salud ambiental relacionada con la calidad del aire.



## GLOSARIO

**Calidad del aire:** La calidad del aire trata de la composición del aire y de la idoneidad del éste para determinadas aplicaciones.

**Contaminantes criterio:** Contaminantes trazadores que permiten establecer el efecto de la contaminación del aire en la salud (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y O<sub>3</sub>).

**Episodio atmosférico:** Momento donde existe un desbordamiento de los valores límite en las concentraciones de los contaminantes, donde se ve afectada la salud de quienes se exponen a dichas concentraciones. En este estudio se asume como episodio de contaminación atmosférica aquel período de tres o más días consecutivos en los que las concentraciones diarias de PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y O<sub>3</sub> exceden el umbral de tres veces los valores límite recomendados por la OMS.

**Estación fija:** Equipo de la red de monitoreo que permanece en un punto fijo en periodos de tiempo superiores a un año.

**Estación móvil:** Equipo de la red de monitoreo que permanece en un punto en periodos de tiempo inferiores a un año.

**Estacionalidad:** Se define como el movimiento hacia arriba o hacia debajo de una serie de tiempo, con respecto a la tendencia y que tiene una duración de menos de un año; esta componente muestra las fluctuaciones periódicas bastante regulares que ocurren en períodos fijos del tiempo, las cuales se deben a condiciones climáticas, costumbres sociales o religiosas, etc.

**Evento centinela:** Enfermedad prevenible, discapacidad o muerte prematura cuya ocurrencia sirve como señal de advertencia de que deben ser intervenidas, con acciones preventivas o terapéuticas.

**Excedencia:** *Evento en el cual los valores de concentración de un contaminante sobrepasan lo estipulado en la norma de calidad del aire local o mundialmente establecida.*

**Fuente de Emisión:** Actividad, proceso u operación, realizado por los seres humanos, o con su intervención, susceptible de emitir contaminantes al aire.

**Fuente fija:** Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.



**Fuente móvil:** Fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

**Historia natural de la enfermedad:** Curso de acontecimientos biológicos entre la acción secuencial de las causas (etiología), el desarrollo de la enfermedad y el desenlace (curación, paso a la cronicidad, discapacidad o muerte), así como sus componentes básicos, entre estos los periodos pre patogénico y patogénico, los cuales corresponden a las manifestaciones de la enfermedad.

**Imputación:** Proceso que utiliza técnicas estadísticas para completar datos faltantes (no encontrados, nulos, y/o no disponibles).

**Material particulado:** Conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas.

**MODEAM:** Base de datos que reporta información de contaminantes tanto para fuentes móviles como fijas

**Modelo AERMOD:** Modelo recomendado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos US-EPA para estimar el impacto de fuentes contaminantes nuevas o existentes sobre los niveles de calidad ambiental del aire a distancias horizontales inferiores de 50 kilómetros.

**Morbilidad:** Término de uso médico y epidemiológico que sirve para señalar la cantidad de personas o individuos considerados enfermos o víctimas de una enfermedad en un espacio y tiempo determinados. La morbilidad se expresa cuantitativamente y su análisis permite valorar el aumento o disminución de los casos/frecuencias relativas/tasas de las enfermedades en un espacio específico.

**Mortalidad:** Expresión demográfica que designa el número de defunciones ocurridas en una población, en un tiempo y lugar determinados. Es un indicador que permite valorar la situación de salud de las poblaciones y junto con los indicadores de morbilidad permite apoyar la planeación y gestión de las políticas públicas sanitarias.

**Ozono:** Gas azul pálido que, en las capas bajas de la atmósfera, se origina como consecuencia de las reacciones entre los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos (gases compuestos de carbono e hidrógeno principalmente) en presencia de la luz solar.

**Red de monitoreo:** Constituida por equipos especializados dirigidos a realizar el seguimiento de las concentraciones de contaminantes en puntos representativos de los diferentes entornos que conforman el Área Metropolitana, información que es analizada conjuntamente con los fenómenos de dispersión, transporte de contaminantes y la distribución de emisiones.

**Rezago:** Días o conjunto de días en que se asume que se presenta el evento en salud en relación al momento en el que se presenta el incremento en las concentraciones del contaminante analizado.

**Serie de tiempo:** Secuencia de observaciones de un fenómeno determinado, ordenadas temporalmente y adquiridas en igual intervalo de tiempo.

**Tendencia:** Componente de la serie de tiempo. Se define como el movimiento general y persistente de los valores de la serie de tiempo durante un número prolongado de periodos, generalmente años. Puede ser creciente o decreciente, lineal o no lineal.



## SIGLAS Y ABREVIATURAS

APVP: Años potenciales de vida perdidos

ARIMA: Autoregressive integrated moving average

AMVA: Área Metropolitana del Valle de Aburrá

BPPIPRIME: Building profile input program

CIE-10: Clasificación internacional de enfermedades, versión 10

CO: Monóxido de carbono

DANE: Departamento administrativo nacional de estadística

ESCALA: Estudio de Salud y Contaminación del Aire de Latinoamérica

ESCAPE: European study of cohorts for air pollution effects

EPS: Empresa promotora de salud

EPOC: Enfermedad pulmonar obstructiva crónica

GAM: Generalized additive model

IDEAM: Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales

NO<sub>x</sub>: Óxidos de nitrógeno

O<sub>3</sub>: Ozono

OMS: Organización Mundial de la Salud

PIGECA: Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire

PM<sub>10</sub>: Material particulado menor o igual a 10 micras



PM<sub>2,5</sub>: Material particulado menor o igual a 2.5 micras

RIPS: Registro individual de prestación de servicios

RUAF: Registro único de afiliados

UPGD: Unidades primarias generadoras de datos

SIATA: Sistema de alerta temprana del Valle de Aburrá

SISPRO: Sistema de información de la protección social

SIVIGILA: Sistema de vigilancia en salud pública

SO<sub>2</sub>: Dióxido de azufre

UI: Unidades informadoras

US-EPA: Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos



## REFERENCIAS

Academia Nacional de Medicina de Colombia. (2013). Período de transmisibilidad. Bogotá, Colombia: Diccionario académico de la medicina. Recuperado a partir de [http://dic.idiomamedico.net/período\\_de\\_transmisibilidad](http://dic.idiomamedico.net/período_de_transmisibilidad)

AMVA, & UPB. (2017). MODEAM. Medellín, Colombia: Sistema Inteligente de Información para el manejo de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá. Recuperado de <http://modemed.upb.edu.co/zigma2/>

Anderson, H. R. (1999). Health Effects of Air Pollution Episodes. En Holgate, S.T., Koren, Hillel S., Samet, J.M., Maynard, R. L. (Eds.), *Air Pollution and Health* (pp. 461-482). Reino Unido: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012352335-8/50096-X>

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2014). Clasificación Estaciones de Monitoreo de Calidad de Aire (Informe semestral Calidad del Aire Diciembre 2012). Medellín, Colombia. Recuperado de [https://www.metropol.gov.co/Paginas/PaginaNoEncontrada.aspx?requestUrl=https://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe%20Semestral%20Calidad%20del%20Aire%20\(Enero-Junio%202015\).pdf](https://www.metropol.gov.co/Paginas/PaginaNoEncontrada.aspx?requestUrl=https://www.metropol.gov.co/CalidadAire/isdocConvenio243/Informe%20Semestral%20Calidad%20del%20Aire%20(Enero-Junio%202015).pdf)

Aregui G, B. (2007). Metodología para la generación de modelos gaussianos de dispersión de contaminantes atmosféricos. (Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional ). Recuperado de: <http://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=7799>

Aristizábal, G. L. (2010). Aspectos de la Circulación atmosférica de Gran escala Sobre el Noroccidente de Suramérica asociada al ciclo Enos 2009-2010 y sus Consecuencias en el régimen de Precipitación en Colombia. [http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010\\_GloriaLeon.pdf](http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418818/Circulaci%C3%B3n+Atmosf%C3%A9rica+ENOS++2009-2010_GloriaLeon.pdf)

Bentayeb, M., Wagner, V., Stempfelet, M., Zins, M., Goldberg, M., Pascal, M., ... Lefranc, A. (2015). Association between long-term exposure to air pollution and mortality in France: A 25-year follow-up study. *Environment International*, 85, 5-14. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.08.006>

Borja-Aburto, V. H. (2000). Estudios ecológicos. *Salud Pública de México*, 42(6), 533-538. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342000000600010>

Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific



statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181dbee1>

Brunekreef, B. (2011). Design of cohort studies for air pollution health effects. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 66(16-19), 1723-1730.

Blanco-Becerra, L. C., Miranda-Soberanis, V., Barraza-Villarreal, A., Junger, W., Hurtado-Díaz, M., & Romieu, I. (2014). Effect of socioeconomic status on the association between air pollution and mortality in Bogotá, Colombia. *Salud Pública de México*, 56 (4), 371-378.

Blanco-Becerra, L. C., Miranda-Soberanis, V., Hernández-Cadena, L., Barraza-Villarreal, A., Junger, W., Hurtado-Díaz, M., & Romieu, I. (2014). Effect of particulate matter less than 10 $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) on mortality in Bogotá, Colombia: a time-series analysis, 1998-2006. *Salud Pública de México*, 56, 363-370.

Carracedo-Martinez, E., Tobías, A., Saez, M., Taracido, M., & Figueiras, A. (2009). Case-crossover design: Basic essentials and applications. *Gaceta sanitaria*, 23(2), 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2008.10.010>

Chapman, P., Clinton, J., Kerber, R., Khabaza, T., Reinartz, T., Shearer, C., & Wirth, R. (2000). CRISP-DM -Cross-Industry Standard Process for Data Mining- 1.0 Step-by-step data mining guide. CRISP-DM Consortium, 1-76. <https://doi.org/10.1109/ICETET.2008.239>

Climate prediction center. (2018). NOAA's Climate Prediction Center. Maryland, US: National Oceanic and Atmospheric Administration's. Recuperado de <http://www.nws.noaa.gov/admin.php>

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)

Departamento Administrativo Nacional de Estadística -DANE. (2013). Ficha Metodológica Estadísticas Vitales – (EEVV). Bogotá, Colombia: Departamento Administrativo Nacional de Estadística Diseño – (DSO) Dirección de Censos y Demografía (DCD). Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/poblacion/ficha\\_vitales\\_13.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/fichas/poblacion/ficha_vitales_13.pdf)

Dong, G.-H., Zhang, P., Sun, B., Zhang, L., Chen, X., Ma, N., ... Chen, J. (2012). Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Respiratory Disease Mortality in Shenyang, China: A 12-Year Population-Based Retrospective Cohort Study. *Respiration*, 84(5), 360-368. <https://doi.org/10.1159/000332930>

Enders, W. (2008). *Applied Econometric Times Series*. Alabama, US: Wiley.

Fitzmaurice, G. M. (2009). Non-linear mixed-effects models. En Fitzmaurice, G., Davidian, M., Geert, B., Geert M. (Eds.), *Longitudinal Data Analysis* (pp. 107-141). Florida, US: CRC Press.

Friedrich, M. (2018). Air Pollution is Greatest Environmental Threat to Health. *JAMA*, 319(11), 1085. <https://doi.org/doi:10.1001/jama.2018.2366>

Gaviria, C., Benavides, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(3), 241-250.

Golub, E., Klytchnikova, I., Sanchez-Martinez, G., Belausteguigoitia, J. C., & Molina, C. M. (2014).





Environmental Health Costs in Colombia. Washington, US: The world bank. Recuperado de <http://documents.worldbank.org/curated/en/657631468047104545/Environmental-health-costs-in-Colombia-the-changes-from-2002-to-2010>

Guaita, R., Pichiule, M., Mate, T., Linares, C., & Diaz, J. (2011). Short-term impact of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on respiratory mortality in Madrid. *International Journal of Environmental Health Research*, 21(4), 260-274. <https://doi.org/10.1080/09603123.2010.544033>

Guicherit, R., & Roemer, M. (2000). Tropospheric ozone trends. *Chemosphere - Global Change Science*, 2(2), 167-183. [https://doi.org/10.1016/S1465-9972\(00\)00008-8](https://doi.org/10.1016/S1465-9972(00)00008-8)

Hernández-Aguado, I., Gil de Miguel, A., & Delgado, M. (2011). *Manual de Epidemiología y Salud Pública: para grados en Ciencias de la Salud*. Madrid, España: Médica Panamericana.

Hernández-Flórez, L. J., Aristizabal-Duque, G., Quiroz, L., Medina, K., Rodríguez-Moreno, N., Sarmiento, R., & Osorio-García, S. D. (2013). Contaminación del aire y enfermedad respiratoria en menores de cinco años de Bogotá, 2007. *Revista de Salud Pública*, 15(4), 503-516. <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/38719/44829>

Herrea Torres, A. M., Alberto, C., Londoño, E., Jaime, G., Vasco, M., Eduardo, J., & Molina, O. (2011). Patologías respiratorias en niños preescolares y su relación con la concentración de Contaminantes en el aire en la Ciudad De Medellín (Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 21-31.

Host, S., Larrieu, S., Pascal, L., Blanchard, M., Declercq, C., Fabre, P., ... Lefranc, A. (2008). Short-term associations between fine and coarse particles and hospital admissions for cardiorespiratory diseases in six French cities. *Occupational and Environmental Medicine*, 65(8), 544-551. <https://doi.org/10.1136/oem.2007.036194>

Huynh, S., Von Euler-Chelpin, M., Raaschou-Nielsen, O., Hertel, O., Tjønneland, A., Lynge, E., ... Andersen, Z. J. (2015). Long-term exposure to air pollution and mammographic density in the Danish Diet, Cancer and Health cohort. *Environmental Health*, 14(1), 31. <https://doi.org/10.1186/s12940-015-0017-8>

Jasinski, R., Pereira, L. A. A., & Braga, A. L. F. (2011). Air pollution and pediatric hospital admissions due to respiratory diseases in Cubatão, São Paulo State, Brazil, from 1997 to 2004. *Cadernos de saúde pública*, 27(11), 2242-2252. <https://doi.org/10.1590/S0102-311X2011001100017>

Jiménez, E., Linares, C., Rodríguez, L. F., Bleda, M. J., & Díaz, J. (2009b). Short-term impact of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on daily mortality among the over-75 age group in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 407(21), 5486-5492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.06.038>

Katsouyanni, K., Touloumi, G., Spix, C., Schwartz, J., Balducci, F., Medina, S., ... Anderson, H. R. (1997). Short term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Bmj*, 314(7095), 1658. <https://doi.org/10.1136/bmj.314.7095.1658>

Katsouyanni, K., Zmirou, D., Spix, C., Sunyer, J., Schouten, JP., Pönkä, A., ... Vigotti, MA. (1995). Short-term effects of air pollution on health: a European approach using epidemiological time-series data. The APHEA project: background, objectives, design. *European Respiratory Journal*, 8(6), 1030-1038



Kim, H. S., Kim, D. S., Kim, H., & Yi, S. M. (2012). Relationship between mortality and fine particles during Asian dust, smog-Asian dust, and smog days in Korea. *International journal of environmental health research*, 22(6), 518-530.

Kloog, I., Nordio, F., Zanobetti, A., Coull, B. A., Koutrakis, P., & Schwartz, J. D. (2014). Short term effects of particle exposure on hospital admissions in the mid-atlantic states: A population estimate. *PloS one*, 9(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088578>

Langseth, J., Vivatrat, N., & Sohn, G. (2010). US 7,849,049 B2. US.

Lazcano-Ponce, E., Fernández, E., Salazar-Martínez, E., & Hernández-Avila, M. (2000). Estudios de cohorte. Metodología, sesgos y aplicación. *Salud Pública de México*, 42(3), 230-241. <https://doi.org/10.1590/S0036-36342000000300010>

Lee, J. T., & Schwartz, J. (1999). Reanalysis of the effects of air pollution on daily mortality in Seoul, Korea: A case-crossover design. *Environmental health perspectives*, 107(8), 633-636

Levy, D., Lumley, T., Sheppard, L., Kaufman, J., Checkoway, H., Epidemiology, S., & Mar, N. (2001). Referent selection in case-crossover analyses of acute health effects of air pollution. *Epidemiology*, 12(2), 186-192. <https://doi.org/10.1097/00001648-200103000-00010>

Maclure, M. (1991). The case-crossover design: a method for studying transient effects on the risk of acute events. *American journal of epidemiology*, 133(2), 144-153

Malley, C. S., Henze, D. K., Kuylentierna, J. C. I., Vallack, H. W., Davila, Y., Anenberg, S. C., ... Ashmore, M. R. (2017). Updated global estimates of respiratory mortality in adults  $\geq 30$  years of age attributable to long-term ozone exposure. *Environmental Health Perspectives*, 125(8), 1-9. <https://doi.org/10.1289/EHP1390>

Martínez, L. E., Quiroz, C. M., & Rúa, J. A. (2011). Morbilidad respiratoria asociada con la exposición a material particulado en el ambiente. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(4), 454-460. <https://doi.org/10.1590/S0120-41572015000500014>

Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial. (2010). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire-Manual de operacion de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial. (24 de Marzo de 2010). Resolución N° 610 de 2010: "Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006". [Resolución N° 610 de 2010]. DO: 47.887. Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (12 de Noviembre de 2017). Resolución 2254 de 2017: " Por la cual se adopta la Norma de Calidad del Aire Ambiente y se dictan otras disposiciones". [Resolución 2254 de 2017]. DO: 50.415. Recuperado de <http://www.ambientalia.com.co/resolucion-2254-2017-la-se-adopta-la-norma-calidad-del-aire-ambiente/>

Ministerio de Salud y Protección Social. (28 de Mayo de 2013). Resolución 1841 de 2013: "Por la cual se adopta el Plan Decenal de Salud Pública, 2012 - 2021".[Resolución 1841 de 2013]. DO:48811. Recuperado de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjurMantenimiento/normas/Norma1.jsp?i=53328>





Molano, J., & Batista, J. M. (1997). Calendario climatológico aeronáutico colombiano. Boletín de la Sociedad Geográfica de Colombia, 24, 1-9.

Neas, L. M., Schwartz, J., & Dockery, D. (1999). A case-crossover analysis of air pollution and mortality in Philadelphia. *Environmental health perspectives*, 107(8), 629-631

Nelson, C. R., & Plosser, C. R. (1982). Trends and random walks in macroeconomic time series: Some evidence and implications. *Journal of Monetary Economics*, 10(2), 139-162. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(82\)90012-5](https://doi.org/10.1016/0304-3932(82)90012-5)

OMS. (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Recuperado de [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf?jsessionid=5E66AA8AB690D7B97E39153FE4DE5A30?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?jsessionid=5E66AA8AB690D7B97E39153FE4DE5A30?sequence=1)

OMS. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report. Recuperado de [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0004/193108/REVIHAAP-Final-technical-report-final-version.pdf?ua=1)

OMS. (2017). Contaminación del Aire Ambiental. Recuperado a partir de [https://www.paho.org/hq/index.php?option=com\\_content&view=article&id=12918%3A2017-ambient-air-pollution&catid=2619%3Aenvironmental-health&Itemid=42246&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918%3A2017-ambient-air-pollution&catid=2619%3Aenvironmental-health&Itemid=42246&lang=es)

OMS. (2018). Calidad del aire y salud. Datos y cifras. Recuperado de [http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](http://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización de Naciones Unidas. (1986). Manual X Técnicas Indirectas De Estimación Demográfica. Recuperado de [https://unstats.un.org/unsd/demographic/standmeth/handbooks/Manual\\_X-es.pdf](https://unstats.un.org/unsd/demographic/standmeth/handbooks/Manual_X-es.pdf)

Organización Panamericana de Salud. (2010). Evaluación epidemiológica. Curso de autoinstrucción de evaluación del riesgo asociado a contaminantes del aire. Recuperado de [http://www.bvsde.paho.org/cursoa\\_riesgoaire/lecciones/leccion1.html](http://www.bvsde.paho.org/cursoa_riesgoaire/lecciones/leccion1.html)

Pablo-Romero, M., Román, R., Limón, J. M. G., & Praena-Crespo, M. (2015). Effects of fine particles on children's hospital admissions for respiratory health in Seville, Spain. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 65 (4), 436-444. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.1001499>

Patto, N. V., Nascimento, L. F. C., Mantovani, K. C. C., Vieira, L. C., & Moreira, D. S. (2016). Exposure to fine particulate matter and hospital admissions due to pneumonia: Effects on the number of hospital admissions and its costs. *Revista da Associação Médica Brasileira*, 62(4), 342-346. <https://doi.org/10.1590/1806-9282.62.04.342>

Plaia, A., & Bondì, A. L. (2006). Single imputation method of missing values in environmental pollution data sets. *Atmospheric Environment*, 40(38), 7316-7330. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.06.040>

Pope III, C. A. (2004). Air Pollution and Health — Good News and Bad. *New England journal of medicine* 351(11), 1132-1133.

Ramos-Herrera S, Bautista-Margulis, R., & Valdez-Manzanilla, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona



norte de Chiapas, México. *Universidad y ciencia*, 26(1), 65-80. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792010000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000100005&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Rodríguez Villamizar, L., López, A. B., Castro, H., Niederbacher, J., & Vera, L. (2010). Incidencia de síntomas respiratorios y su asociación con contaminación atmosférica en preescolares: un análisis multinivel. *Cadernos de Saúde Pública*, 26(7), 1411-1418.

Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L. A., Junger, W., Vera, J., Strappa, V., ... & Tzintzun-Cervantes, G. (2012). Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study). *Research report (Health Effects Institute)*, (171), 5-86.

Rothwell, C. J., Hamilton, C. B., & Leaveron, P. E. (1991). Identification of sentinel health events as indicators of environmental contamination. *Environmental Health Perspectives*, 94, 261-263.

Rutstein, D. D., Mullan, R. J., Frazier, T. M., & Halperin, W. E. (1983). Sentinel health events (occupational): a basic for physician recognition and public health surveillance. *American Journal of Public Health*, 73(9), 1054-1062.

Saez, M., Pérez-Hoyos, S., Tobias, A., Saurina, C., Barceló, M., & Ballester, F. (1999). Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica. *Revista Española de Salud Pública*, 73(2), 133-143.

Saini, R., Taneja, A., & Singh, P. (2017). Surface ozone scenario and air quality in the north-central part of India. *Journal of Environmental Sciences*, 59, 72-79. <https://doi.org/10.1016/J.JES.2017.02.008>

Schwartz, J., Spix, C., Touloumi, G., Bachárová, L., Barumamdzadeh, T., Le Tertre, A., ...Schouten, J.P. (1996). Methodological issues in studies of air pollution and daily counts of deaths or hospital admissions. *Journal of Epidemiology & Community Health*, 50(Suppl 1), S3-S11.

Schwartz, J. (2000). Harvesting and long term exposure effects in the relation between air pollution and mortality. *American journal of epidemiology*, 151(5), 440-448.

SCRIBD. (2018). Historia Natural de la Enfermedad. Bogotá, Colombia. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/232489887/Historia-Natural-de-La-Enfermedad>

Stafoggia, M., Cesaroni, G., Peters, A., Andersen, Z. J., Badaloni, C., Beelen, R., ... Forastiere, F. (2014). Long-term exposure to ambient air pollution and incidence of cerebrovascular events: Results from 11 European cohorts within the ESCAPE project. *Environmental Health Perspectives*, 122(9), 919. <https://doi.org/10.1289/ehp.1307301>

Tomczak, A., Miller, A. B., Weichenthal, S. A., To, T., Wall, C., van Donkelaar, A., ... Villeneuve, P. J. (2016). Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and the risk of lung cancer among participants of the Canadian National Breast Screening Study. *International Journal of Cancer*, 139 (9), 1958-1966. <https://doi.org/10.1002/ijc.30255>

Valencia, A., Lozano, C., & Moreno, C. (2007). Modelo de promedios móviles para el pronóstico horario de potencia y energía eléctrica. *El Hombre y la Máquina*, (29), 96-105.

Van Drie, J. H. (2008). The Boltzmann/Shannon entropy as a measure of correlation. *arXiv preprint math-ph/0001024*, (2), 1-5.

Venkatram, A.(2005). Introduction to aermod. Recuperado de [https://www.engr.ucr.edu/~venky/Introduction\\_AERMOD\\_2008%20.pdf](https://www.engr.ucr.edu/~venky/Introduction_AERMOD_2008%20.pdf)





Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science. An Introductory Survey*. Washington, US: Elsevier.

Wong, C.-M., Vichit-Vadakan, N., Kan, H., & Qian, Z. (2008). Public Health and Air Pollution in Asia (PAPA): A Multicity Study of Short-Term Effects of Air Pollution on Mortality. *Environmental Health Perspectives*, 116(9), 1195-1202. <https://doi.org/10.1289/ehp.11257>

Yang, Y., Li, R., Li, W., Wang, M., Cao, Y., Wu, Z., & Xu, Q. (2013). The Association between Ambient Air Pollution and Daily Mortality in Beijing after the 2008 Olympics: A Time Series Study. *PloS one*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0076759>

Zhang, J., Liu, Y., Cui, L. L., Liu, S. Q., Yin, X. X., & Li, H. C. (2017). Ambient air pollution, smog episodes and mortality in Jinan, China. *Scientific Reports*, 7(1), 11209.

Zhao, Z., & Wang, Y. (2017). Influence of the West Pacific subtropical high on surface ozone daily variability in summertime over eastern China. *Atmospheric Environment*, 170, 197-204. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2017.09.024>

Zúñiga, J., Tarajia, M., Herrera, V., Urriola, W., Gómez, B., & Motta, J. (2016). Assessment of the possible association of air pollutants PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> with an increase in cardiovascular, respiratory, and diabetes mortality in Panama City: A 2003 to 2013 data analysis. *Medicine*, 95(2). <https://doi.org/10.1097/MD.0000000000002464>





CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA  
**Y SUS EFECTOS SOBRE**  
LA SALUD DE LOS HABITANTES DEL  
**VALLE DE ABURRÁ**

**2008-2015**

CONTRATO NO. CCT 1088 DE 2016



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

Facultad Nacional de Salud Pública  
Héctor Abad Gómez

[www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)



**METROPOLITANA  
Valle de Aburrá**

[www.metropol.gov.co](http://www.metropol.gov.co)

ISBN: 978-958-8513-92-8



9 789588 513928