

Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 - 2015



Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 – 2015

Juan Manuel Santos Calderón

Presidente de la República de Colombia

Luis Gilberto Murillo

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Carlos Alberto Botero López

Viceministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Omar Franco Torres

Director General

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM

Rocío Rodríguez Granados

Subdirectora de Estudios Ambientales - IDEAM

Producción técnica y editorial

Ana María Hernández Hernández

Oscar Julián Guerrero Molina

Subdirección de Estudios Ambientales – IDEAM

Diseño de portada y diagramación

María Alexandra Benítez Gómez

Juan Pablo Moreno Guerra

Grupo de Comunicaciones - IDEAM

Cítese como

IDEAM, Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011-2015 Bogotá, D.C., 2016.

2016, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Todos los derechos reservados. Los textos pueden ser usados parcial o totalmente citando la fuente. Su reproducción total o parcial debe ser autorizada por el IDEAM.

Publicación aprobada por el IDEAM octubre de 2016, Bogotá D.C., Colombia - Distribución Gratuita.

ISBN: 978-958-8067-84-1

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM

OMAR FRANCO TORRES
Director General – IDEAM

ADRIANA PORTILLO TRUJILLO
Secretaria General – IDEAM

Consejo Directivo

LUIS GILBERTO MURILLO

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

NATALIA AVELLO VIVES

Ministra de Transporte

SIMÓN GAVIRIA MUÑOZ

Director, Departamento Nacional de Planeación- DNP

MAURICIO PERFFETI DEL CORRAL

Director, Departamento Nacional de Estadísticas-DANE

JUAN PABLO RUIZ SOTO

Delegado, Presidencia de la República

RAMÓN LEAL LEAL

Director Ejecutivo. Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible –

ASOCARS

YANETH GIHA TOVAR

Directora General, Departamento Administrativo de Ciencia Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS

DIRECTIVAS

ROCÍO RODRÍGUEZ GRANADOS
Subdirectora de Estudios Ambientales

IVONNE MARITZA VARGAS PADILLA
Coordinadora Grupo de Comunicaciones

MARÍA SARALUX VALBUENA LÓPEZ
Subdirectora de Ecosistemas e Información
Ambiental

LEONARDO CÁRDENAS CHITIVA
Jefe Oficina de Informática

NELSON OMAR VARGAS MARTÍNEZ
Subdirector de Hidrología

GILBERTO ANTONIO RAMOS SUÁREZ
Jefe Oficina Asesora Jurídica

YADIRA CÁRDENAS POSSO
Subdirectora de Meteorología

MARÍA EUGENIA PATIÑO JURADO
Jefe Oficina Control Interno

CHRISTIAN FELIPE EUSCATEGUI COLLAZOS
Jefe Oficina Pronósticos y Alertas

DIANA QUIMBAY VALENCIA
Jefe Oficina Cooperación Internacional

JUAN CARLOS ARTURO LOBO TORRES
Jefe Oficina Asesora de Planeación

Agradecimientos

Al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Dirección de Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana, especialmente al Ingeniero Sergio Hernández, por sus observaciones, recomendaciones y gestión.

A la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Grupo de Investigación de Calidad del Aire, en especial al Doctor Rodrigo Jiménez Pizarro, por brindar los espacios de discusión de los resultados y por las sugerencias y observaciones resultantes.

A Luis Alexander Benavides Pardo, quien se desempeñó como Coordinador del Grupo de Seguimiento a la Sostenibilidad del Desarrollo de la Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM, por su apoyo constante durante la elaboración de este informe y por sus recomendaciones.

A Alexander Martínez Montero, por sus valiosas observaciones y recomendaciones técnicas durante su ejercicio como Subdirector de Estudios Ambientales del IDEAM.

A los funcionarios y contratistas de la Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM por todo su apoyo, especialmente a Andrea Moreno y Germán García.

A los profesionales del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC), especialmente al Ingeniero Yesid Fandiño, por su colaboración en la representación espacial de los resultados.

A los profesionales Franklyn Ruiz, Henry Benavides y Luis Barreto de la Subdirección de Meteorología del IDEAM, quienes brindaron elementos valiosos para el análisis de la información meteorológica proporcionada por los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire.

A los profesionales Astrid Herrera, Gildardo Bermeo y Lina Guerrero del Ministerio de Salud y Protección Social, quienes compartieron su experiencia e información con el IDEAM para la aproximación inicial al análisis comparativo de contaminación atmosférica e Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

A los profesionales de las Corporaciones Autónomas Regionales y de las Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos (AMVA, CAM, CAR, CARDER, CDMB, CORANTIOQUIA, CORNARE, CORPAMAG, CORPOBOYACÁ, CORPOCALDAS, CORPOCESAR, CORPOGUAJIRA, CORPONARIÑO, CORPONOR, CORTOLIMA, CRC, CRQ, CVC, CVS, DAGMA y SDA) por el proceso de consecución de la información requerida para la elaboración de este informe, por su trabajo en campo y por la retroalimentación dada a las observaciones e inquietudes comunicadas por el IDEAM. Se da especial agradecimiento a AMVA y CORPOBOYACÁ por contribuir con los estudios de caso de los capítulos décimo y undécimo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma prestaron su ayuda en la realización del presente documento.

Prólogo

La contaminación atmosférica es un fenómeno que afecta negativamente la salud y el bienestar humano, especialmente en los grandes centros urbanos, y genera efectos adversos en el medio ambiente. Aunque la degradación de la calidad del aire puede estar relacionada con fuentes de origen natural, la actividad antropogénica representa una contribución significativa a esta problemática ya que es responsable de la emisión de contaminantes por actividades relacionadas con el transporte, la industria, el desarrollo de la infraestructura, entre otras.

Conocer el estado de la calidad del aire en Colombia es fundamental para determinar: las zonas en las cuales hay mayor potencial de afectación de la salud humana; los contaminantes cuyas concentraciones superan los niveles máximos permisibles establecidos en la normatividad nacional, su distribución en el tiempo y en el espacio, y las fuentes de emisión asociadas a los mismos. Esta información contribuye a la formulación de políticas públicas a nivel nacional encaminadas a la protección del bienestar de la población y del medio ambiente.

En este sentido, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, pone a disposición del público, la academia, las entidades nacionales públicas y privadas, la comunidad internacional, y demás interesados, el Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia para los años 2011 a 2015; este es el tercer documento correspondiente a la actualización de dos informes previos que fueron publicados en 2007 y 2012.

El informe fue elaborado con base en los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos por parte de 21 Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) administrados por las Corporaciones Autónomas Regionales y las Autoridades Ambientales de los Grandes Centros Urbanos. La información base reside en el subsistema SISAIRES, el cual hace parte del Sistema de Información Ambiental de Colombia – SIAC. Su contenido se enfoca en presentar el estado actual de los diferentes SVCA del país, los indicadores de gestión asociados al monitoreo, el análisis temporal y espacial de las concentraciones de contaminantes criterio entre 2011 y 2015, su asociación con el comportamiento meteorológico y una primera aproximación al análisis comparativo con número de personas con Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

La consolidación de la base de datos definitiva para realizar los análisis fue el producto de un proceso de retroalimentación constructiva entre el IDEAM y las autoridades ambientales regionales y locales, la cual permitió además ampliar el panorama a nivel nacional de la gestión de la calidad del aire en diferentes regiones del país. Esta metodología será implementada periódicamente con el fin de asegurar la consistencia de la información que se reporta continuamente a SISAIRES.

Se espera a futuro lograr una actualización permanente de este tema aumentando la frecuencia en la publicación de los respectivos documentos técnicos.

OMAR FRANCO TORRES

Director General – IDEAM

Resumen para tomadores de decisiones

El estado de la calidad del aire es un factor importante que influye en la salud y en el bienestar de las personas. Su deterioro se relaciona con los efectos de las emisiones de contaminantes a la atmósfera, provenientes de fuentes de diferentes clases y orígenes, las cuales son causadas por la actividad humana o natural. Entre estas se destacan las fuentes fijas asociadas principalmente a los procesos industriales y de manufactura; las fuentes móviles que se relacionan con actividades de transporte y las fuentes naturales que involucran los incendios forestales, la actividad volcánica, la erosión, entre otros.

Con el propósito principal de conocer el panorama de la contaminación atmosférica en Colombia, se han diseñado e implementado Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) que son administrados por las autoridades ambientales. Entre los años 2011 y 2015 operaron 21 SVCA en diferentes regiones del país cuya configuración y propósito diferían según las características socioeconómicas de su área de jurisdicción; además, su tecnología y complejidad variaban sustancialmente, lo que resultaba en una red nacional heterogénea.

Los contaminantes que fueron monitoreados en estos SVCA fueron los reglamentados como *criterio* en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y que se enmarcan en dos grupos: material particulado, el cual según su tamaño puede clasificarse como Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado Menor a 10 Micras (PM_{10}) y Material Particulado Menor a 2,5 Micras ($PM_{2.5}$); y gases que comprenden el ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2). Cada uno de estos contaminantes tienen límites máximos permisibles en sus concentraciones para diferentes tiempos de exposición, cuya formulación tiene un sustento científico de sus efectos potenciales en la salud pública.

Los datos que fueron insumo para la elaboración de este informe nacional fueron validados y cargados a la plataforma SISAIRE por las autoridades ambientales de acuerdo con lo establecido en la Resolución 651 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Sin embargo, con el objetivo principal de asegurar la calidad de la información reportada, el IDEAM realizó una segunda revisión al conjunto de datos, encontrando en el proceso potenciales inconsistencias tales como datos inusualmente altos, cambios abruptos en las tendencias, valores negativos, entre otras. Esta evidencia condujo a la elaboración de informes de observaciones dirigidos a cada autoridad ambiental para que, dentro de sus competencias procedieran a la verificación de los datos y a un posible ajuste de acuerdo con los respectivos procesos de control de calidad.

La gestión realizada con las Autoridades Ambientales no sólo logró mejorar la calidad de la información reportada a SISAIRE, sino que además permitió identificar algunas limitaciones en la operación de sus SVCA que afectaban la calidad y abundancia de los datos. Dentro de estas se identificaron limitaciones relacionadas con las operaciones llevadas en campo en cuanto a la falta recursos para el mantenimiento de los equipos, ausencia de un control de calidad efectivo de la información capturada, siniestros causados por factores naturales y humanos, fallas constantes en el suministro de la energía eléctrica e insuficiencia de personal para la operación de los SVCA de acuerdo con la magnitud de la logística requerida. Aunque estos inconvenientes eran comunes en varios sistemas, se encontraron diferencias significativas en cuanto al nivel de gestión de los mismos, identificando que en algunos la calidad y abundancia de los datos era notablemente superior en comparación con otros donde se evidenció un gran número de inconsistencias y de ausencia de información.

La base de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos que finalmente fue consolidada por el IDEAM se perfiló como el insumo básico a partir del cual se realizaron los cálculos y análisis que permitieron

determinar el estado de la calidad del aire en Colombia entre los años 2011 y 2015. El procedimiento consistió de seis actividades principales: 1) la evaluación de la gestión realizada por las autoridades ambientales en cuanto a la representatividad temporal de la información reportada teniendo en cuenta que en los SVCA permanentes debe existir mínimo una cobertura temporal de 75% al año con respecto al total posible de datos válidos a obtener; 2) la determinación del cumplimiento normativo mediante la comparación de las concentraciones de los contaminantes criterio con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010; 3) el análisis de las tendencias temporales y espaciales de la calidad del aire monitoreada en los diferentes SVCA; 4) la estimación del Índice de Calidad del Aire (ICA) para cada contaminante y estación de monitoreo, el cual permite identificar los efectos potenciales adversos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la salud pública; 5) el cruce de información de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos con información de variables meteorológicas; y 6) la aproximación inicial al cruce de información de material particulado con casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA).

En términos generales, los contaminantes que representaron más incumplimientos de los límites máximos permisibles, así como el mayor potencial de afectación a la salud pública fueron el material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} , especialmente en las zonas donde la densidad de población es alta y donde se desarrollan actividades especiales asociadas principalmente con la minería.

El PM_{10} fue monitoreado en más del 80% de las estaciones de calidad del aire del país, correspondiendo al contaminante con mayor seguimiento entre los SVCA. Tanto en sus tiempos de exposición anual y diario, sus concentraciones fueron excedidas principalmente en zonas correspondientes al Área Metropolitana del Valle de Aburrá, a las ciudades de Bogotá y Bucaramanga, a la jurisdicción de la CAR y a la Zona Minera del Departamento del Cesar. Los valores del Índice de Calidad del Aire muestran momentos en los cuales la calidad del aire fue catalogada como moderada y en ocasiones dañina a la salud para grupos sensibles (niños, adultos mayores y personas con antecedentes de enfermedades cardiovasculares y respiratorias). Sus tendencias interanuales en las diferentes jurisdicciones son mixtas, pero en particular se observaron aumentos progresivos de concentración entre 2011 y 2015 en algunas estaciones de los SVCA ubicados en la Región Caribe, correspondientes a CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA.

Dada la importancia de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la afectación del bienestar humano, su monitoreo se está incrementando en el país pasando de 11% de estaciones con equipos de medición en 2011 a 21% en 2015. Este informe nacional es el primero que reporta las tendencias de este contaminante obedeciendo a una mayor disponibilidad de información para el análisis. Las concentraciones más altas fueron observadas en Bogotá y en el Valle de Aburrá, donde la densidad de población es alta, y en la Zona Minera del Departamento del Cesar con ocurrencia de excedencias en algunas ocasiones, especialmente en la capital del país.

El Índice de Calidad del Aire (ICA) muestra una situación más preocupante para el $PM_{2.5}$ en comparación con el PM_{10} ya que hay una participación notablemente mayor de momentos con calidad del aire moderada y dañina a la salud para grupos sensibles y en ocasiones se evidenciaron episodios con categoría dañina a la salud, la cual representa incrementos de los síntomas respiratorios para todos los grupos poblacionales. Los resultados evidencian la necesidad a nivel nacional de incrementar el número de equipos de monitoreo de este contaminante con el objetivo de determinar con mejor escala espacio-temporal el estado de la calidad del aire con respecto a este contaminante y contribuir a optimizar las medidas necesarias a favor de la reducción de sus concentraciones.

Las Partículas Suspendidas Totales (**PST**) también presentaron incumplimientos normativos en la Zona Minera del Departamento del Cesar (especialmente en el área de influencia de la estación Plan Bonito), en

Santa Marta y en Bogotá, lo cual es concordante con las observaciones dadas para el material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}). Para este contaminante no hay umbrales que permitan la determinación del Índice de Calidad del Aire debido a que éstos están implícitos en las partículas de menor tamaño.

El ozono (O_3) presentó excedencias en algunas estaciones de Bogotá, Bucaramanga, Cali y el Valle de Aburrá, especialmente en estas dos últimas jurisdicciones, donde algunas zonas superaron 100 días al año con incumplimientos. Estas observaciones contrastan con las obtenidas a partir el cálculo del Índice de Calidad del Aire en el cual la proporción de horas con una categoría buena fue de mínimo 96,9%. Es importante destacar que el límite máximo permisible establecido en la Resolución 610 de 2010 para este contaminante en un tiempo de exposición de 8 horas es $80 \mu g/m^3$ el cual es más estricto que el valor guía recomendado por la Organización Mundial de la Salud de $100 \mu g/m^3$ y que el umbral de $116 \mu g/m^3$, sobre el cual se define una calidad del aire moderada.

En general, el dióxido de nitrógeno (NO_2) no presentó excedencias de los respectivos límites normativos, salvo un máximo de dos días de excedencias en la estación Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM) en 2014 en el Valle de Aburrá. Los niveles de concentración monitoreados en el país para este contaminante no fueron lo suficientemente altos para ser clasificados dentro de una categoría específica del Índice de Calidad del Aire de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

El monóxido de carbono (CO) no presentó incumplimientos normativos durante los cinco años estudiados y la calidad del aire, según el ICA, se enmarcó en una clasificación buena. Una excepción ocurrió en un episodio singular de alta concentración en la estación Cabecera de Bucaramanga el 24 y 25 de septiembre de 2011 donde la calidad del aire fue moderada.

Finalmente, el dióxido de azufre (SO_2) no excedió los límites máximos permisibles en ninguna ocasión y la calidad del aire fue predominantemente buena con una proporción mayor al 99,7%. El 0,3% restante corresponde a una calidad del aire moderada en la estación Carvajal – Sevillana, ubicada en la ciudad de Bogotá.

En cuanto a la aproximación inicial del cruce de información de material particulado con casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA), se encontró similitud de tendencias para varios años y estaciones, evidenciando la influencia de la contaminación atmosférica en la afectación de la salud de la población. Sin embargo, se necesita profundizar en los análisis de manera que se incluyan otras variables y métodos que expliquen comportamientos para los cuales no se encontró una explicación inmediata.

Tabla de Contenido

Agradecimientos	4
Prólogo	5
Resumen para tomadores de decisiones	6
1. Introducción.....	19
2. Metodología	21
3. Evolución del monitoreo de la calidad del aire en Colombia.....	25
4. Contaminantes criterio y norma de calidad del aire en Colombia	33
4.1. Material particulado	33
4.2. Dióxido de azufre (SO ₂).....	33
4.3. Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	33
4.4. Ozono (O ₃)	34
4.5. Monóxido de carbono (CO).....	34
4.6. Norma de calidad del aire	34
5. Análisis de la cobertura temporal de la información.....	36
5.1. Criterio de cobertura o representatividad temporal	36
5.2. Causas de la disminución de la representatividad temporal	37
5.3. Evaluación de la cobertura temporal de los datos de las autoridades ambientales	38
6. Estado de la calidad del aire en Colombia entre los años 2011 y 2015.....	41
6.1. Partículas Suspendidas Totales (PST).....	43
6.2. Material particulado PM ₁₀	55
6.3. Material particulado PM _{2.5}	80
6.4. Ozono (O ₃)	98
6.5. Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	110
6.6. Monóxido de Carbono (CO)	119
6.7. Dióxido de azufre (SO ₂).....	120
7. Análisis de la calidad del aire y su relación con variables meteorológicas	127
7.1. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)	128
7.2. Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)	130
7.3. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA).....	132
7.4. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA).....	134
8. Análisis comparativo de tendencias de contaminación atmosférica e Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) 141	
8.1. Contextualización	141

8.2.	AMVA (Medellín)	143
8.3.	CAM (Neiva).....	144
8.4.	CDMB (Bucaramanga).....	146
8.5.	CORPONARIÑO (Pasto).....	147
8.6.	SDA (Bogotá)	149
8.7.	Conclusiones.....	150
9.	Conclusiones y perspectivas.....	151
10.	Estudio de caso: Informe técnico del episodio crítico de calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Marzo de 2016.	153
10.1.	Resumen ejecutivo.....	154
10.2.	Condiciones de calidad del aire.....	155
10.3.	Condiciones meteorológicas	156
10.4.	Medidas aplicadas durante el episodio	159
10.5.	Análisis del impacto en la calidad del aire de las medidas aplicadas.....	161
10.6.	Lecciones aprendidas: acciones- decisiones	161
10.7.	Acciones de mejora fundamentadas en la experiencia del episodio marzo – abril 2016	161
10.8.	Conclusiones.....	162
11.	Estudio de caso: CORPOBOYACÁ. Estado de la calidad del aire reportada a SISAIRE periodo 2011-2015	163
11.1.	Presentación	164
11.2.	Análisis de calidad del aire periodo 2011-2015.....	164
11.3.	Conclusiones.....	172
12.	Glosario de términos.....	173
13.	Referencias.....	176
I.	Anexo: Factores de Conversión de Unidades.....	178
II.	Anexo: Abreviaturas de los nombres de las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.	179

Lista de Figuras

Figura 2-1.	Esquema de interacciones del IDEAM con las autoridades ambientales de Colombia respecto a la gestión de la información de calidad del aire para la elaboración del Informe del Estado de la Calidad del Aire 2011 – 2015.	21
Figura 2-2.	Flujograma que describe la metodología de elaboración del Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia entre 2011 y 2015.	24
Figura 3-1.	Participación porcentual de los contaminantes medidos por las autoridades ambientales en Colombia a diciembre de 2010.	30
Figura 3-2.	Participación porcentual de los contaminantes medidos por las autoridades ambientales en Colombia a diciembre de 2015.	30
Figura 3-3.	Número de estaciones que monitorearon los contaminantes criterio durante el período 2011-2015.	31
Figura 3-4.	Número de estaciones que monitorearon variables meteorológicas durante el período 2011-2015.	31
Figura 3-5.	Porcentaje de distribución de las estaciones por tecnología de medición durante el período 2011-2015.	32
Figura 5-1.	Proporción de series anuales de los SVCA con una cobertura temporal igual o superior a 75% con respecto al total para cada año y contaminante.	39
Figura 5-2.	Proporción de series anuales de los SVCA con una cobertura temporal igual o superior a 75% con respecto al total para cada año y variable meteorológica.	39
Figura 6-1.	Concentraciones promedio anuales entre 2011 y 2014 de Partículas Suspendidas Totales (PST) para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición anual. Los promedios son geométricos.	46
Figura 6-2.	Concentraciones promedio anuales de Partículas Suspendidas Totales (PST) en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.	47
Figura 6-3.	Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de AMVA, CAR y de SDA que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.	48
Figura 6-4.	Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA que tienen una cobertura temporal igual o superior a 75%.	49
Figura 6-5.	Número de días de excedencias de las concentraciones de PST al límite máximo permisible diario de 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por estación para el SVCA de CORPOCESAR entre 2011 y 2015.	50
Figura 6-6.	Concentraciones promedio anuales de PM_{10} entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.	62
Figura 6-7.	Concentraciones promedio anuales de PM_{10} en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.	63
Figura 6-8.	Concentraciones promedio anuales de PM_{10} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA AMVA, CDMB, DAGMA y SDA con una representatividad temporal igual o superior a 75%.	64
Figura 6-9.	Concentraciones promedio anuales de PM_{10} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA con una representatividad temporal igual o superior a 75%.	65

Figura 6-10.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CAR, CORANTIOQUIA y CORPOCALDAS con una cobertura temporal de mínimo 75%.....	66
Figura 6-11.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CORPONARIÑO y CRQ con una cobertura temporal de mínimo 75%.....	67
Figura 6-12.	Número de días que exceden el límite máximo permisible de 100 µg/m ³ de PM ₁₀ en un tiempo de exposición diario, establecido de acuerdo con la Resolución 610 de 2010, para los SVCA de Colombia entre los años 2011 y 2014.....	68
Figura 6-13.	Número de días que exceden el límite máximo permisible de 100 µg/m ³ de PM ₁₀ en un tiempo de exposición diario, establecido de acuerdo con la Resolución 610 de 2010, para los SVCA de Colombia entre los años 2015.	69
Figura 6-14.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire para PM ₁₀ en las estaciones del SVCA de AMVA entre 2011 y 2015.	75
Figura 6-15.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire para PM ₁₀ en las estaciones del SVCA de la CAR entre 2011 y 2015.	76
Figura 6-16.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM ₁₀ en las estaciones del SVCA de CORPAMAG entre 2011 y 2015.....	77
Figura 6-17.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM ₁₀ en las estaciones del SVCA de CORPOCESAR entre 2011 y 2015.	78
Figura 6-18.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM ₁₀ en las estaciones de la SDA entre 2011 y 2015.	79
Figura 6-19.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} entre 2011 y 2014 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. 84	84
Figura 6-20.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} en 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.	85
Figura 6-21.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA AMVA, CORPOCALDAS, CORPOCESAR y CORPONARIÑO que cumplieron con el criterio de cobertura temporal de mínimo 75%.	86
Figura 6-22.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA DAGMA y SDA que cumplieron con el criterio de cobertura temporal de mínimo 75%. 87	87
Figura 6-23.	Días de excedencias de PM _{2.5} del límite máximo permisible de 50 µg/m ³ en un tiempo de exposición diario entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.	88
Figura 6-24.	Días de excedencias de PM _{2.5} del límite máximo permisible de 50 µg/m ³ en un tiempo de exposición diario en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.	89
Figura 6-25.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM _{2.5} para los SCVA del Valle de Aburrá, correspondientes a AMVA en 2011, 2013, 2014 y 2015, y a CORANTIOQUIA en 2012.	93
Figura 6-26.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM _{2.5} para el SVCA de la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR) entre 2011 y 2015.....	94
Figura 6-27.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM _{2.5} para el SVCA de la ciudad de Bogotá (SDA) entre 2011 y 2015.....	95
Figura 6-28.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM _{2.5} para los SVCA de la ciudad de Pereira (CARDER, 2011), Bucaramanga (CDMB, 2011), Manizales (CORPOCALDAS, 2012 y 2014) y de Pasto (CORPONARIÑO, 2014 y 2015).	96

Figura 6-29.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM _{2.5} para el SVCA de la ciudad de Cali (DAGMA, 2014 y 2015).	97
Figura 6-30.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2014. El límite máximo permisible es 80 µg/m ³ en un tiempo de exposición de 8 horas.....	101
Figura 6-31.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% en 2015. El límite máximo permisible es 80 µg/m ³ en un tiempo de exposición de 8 horas.	102
Figura 6-32.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75% entre 2011 y 2015. El límite máximo permisible es 80 µg/m ³ en un tiempo de exposición de 8 horas.....	103
Figura 6-33.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2014. Límite de 120 µg/m ³ en un tiempo de exposición horario.....	104
Figura 6-34.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% en 2015. Límite de 120 µg/m ³ en un tiempo de exposición horario.....	105
Figura 6-35.	Días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75% entre 2011 y 2015. Límite de 120 µg/m ³ en un tiempo de exposición horario.....	106
Figura 6-36.	Concentraciones promedio anuales de NO ₂ entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%. 112	
Figura 6-37.	Concentraciones promedio anuales de NO ₂ en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.....	113
Figura 6-38.	Concentraciones anuales de NO ₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75% (AMVA, CDMB, CORANTIOQUIA).....	114
Figura 6-39.	Concentraciones anuales de NO ₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75% (CAR, SDA).	115
Figura 6-40.	Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) en el año 2011 para las estaciones Cabecera y Centro de la ciudad de Bucaramanga en el año 2011.....	119
Figura 6-41.	Concentraciones promedio anuales de SO ₂ entre 2011 y 2014 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.	122
Figura 6-42.	Concentraciones promedio anuales de SO ₂ en 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.	123
Figura 6-43.	Concentraciones promedio anuales de SO ₂ entre 2011 y 2015 de las estaciones de los SVCA CDMB y SDA que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.	124
Figura 7-1.	Rosa de contaminación por PM ₁₀ para la estación MED-PJIC de AMVA de 2015, la cual presentó representatividad temporal superior a 75% en velocidad del viento, dirección del viento y concentración de PM ₁₀ . Concentraciones en µg/m ³	128
Figura 7-2.	Diagramas polares anulares para las concentraciones de PM ₁₀ en las estaciones BEL-USBV, GIR-IECO e ITA-CONC de AMVA en 2015. Concentraciones en µg/m ³	129
Figura 7-3.	Diagramas polares anulares de las concentraciones de PM _{2.5} para las estaciones CAL-LASA, ITA-CJUS, ITA-CONC y MED-UNNV de AMVA en 2015. Concentraciones en µg/m ³	130
Figura 7-4.	Rosas de contaminación de las concentraciones de PM ₁₀ para las estaciones ZM02 La Jagua Centro y ZM22 Casacará en 2015. Concentraciones en µg/m ³	131

Figura 7-5.	Rosa de contaminación de las concentraciones de PM _{2.5} para la estación ZM22 Casacará en 2015. Concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	131
Figura 7-6.	Rosa de contaminación de las concentraciones de PM ₁₀ para la estación Pance de DAGMA en 2015. Concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	132
Figura 7-7.	Diagrama polar anular de las concentraciones de PM ₁₀ para la estación Pance de DAGMA en 2015. Concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	133
Figura 7-8.	Diagrama polar que relaciona velocidad del viento, dirección del viento y concentración de PM ₁₀ para la estación DAGMA – Pance en 2015. Concentraciones en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	134
Figura 7-9.	Rosas de contaminación por PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para varias estaciones de la SDA en 2015 que presentaron representatividad temporal igual o superior a 75%	135
Figura 7-10.	Rosas de contaminación por PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para varias estaciones de la SDA en 2015 que presentaron representatividad temporal superior a 75%	136
Figura 7-11.	Diagramas polares anulares para PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para varias estaciones de la SDA en 2015.	137
Figura 7-12.	Diagramas polares anulares para PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) para varias estaciones de la SDA en 2015.	138
Figura 7-13.	Diagramas polares de las concentraciones de PM ₁₀ para las estaciones de la SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%	139
Figura 7-14.	Diagramas polares de las concentraciones de PM _{2.5} para las estaciones de la SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%	140
Figura 8-1.	Ganancia promedio en esperanza de vida (meses) para personas mayores de 30 años debido a una disminución anual promedio en 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM _{2.5} . Fuente: APHEKOM, http://www.endseurope.com/docs/110302b.pdf	143
Figura 8-2.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM _{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Medellín... ..	143
Figura 8-3.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de concentraciones diarias de PM ₁₀ y de número de casos atendidos por IRA (en negro) para la ciudad de Medellín.	144
Figura 8-4.	Evolución temporal entre 2011 y 2013 de las medianas de las concentraciones diarias de PM _{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Neiva.	145
Figura 8-5.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM ₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Neiva.....	145
Figura 8-6.	Evolución temporal en 2011 de las medianas de las concentraciones diarias de PM _{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bucaramanga. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (Centro y Personas Atendidas).....	146
Figura 8-7.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM ₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bucaramanga....	147
Figura 8-8.	Evolución temporal entre 2013 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM _{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Pasto. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (IDSN y Personas Atendidas).	148
Figura 8-9.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM ₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Pasto. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (Unimar y Personas Atendidas).....	148
Figura 8-10.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM _{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bogotá. Hasta el año 2013 solamente se contaba con datos válidos de PM _{2.5} para la estación Kennedy....	149
Figura 8-11.	Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM ₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bogotá.	150

Figura 10-1.	Seguimiento realizado por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá al Índice de Calidad del Aire para las estaciones de la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá que monitorean $PM_{2.5}$ y PM_{10} .	156
Figura 10-2.	Condiciones normales y condiciones durante la contingencia en el Valle de Aburrá.	157
Figura 10-3.	Distribución espacial del valor del ICA para $PM_{2.5}$ entre las 5 pm del 2 de abril y las 5 pm del 3 de abril de 2016.	158
Figura 10-4.	Distribución espacial de ICA $PM_{2.5}$ entre las 11 pm del 2 de abril y las 11 pm del 3 de abril de 2016.	159
Figura 11-1.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2011-2015.	164
Figura 11-2.	Comportamiento del Material particulado PM_{10} , Estación Recreo Años 2011-2015.	165
Figura 11-3.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2014-2015.	166
Figura 11-4.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} , Estación Hospital Años 2014-2015.	166
Figura 11-5.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2011-2012.	167
Figura 11-6.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} , Estación Nazareth Años 2011-2012.	168
Figura 11-7.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2011-2012.	169
Figura 11-8.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} , Estación Paipa Años 2011-2012.	170
Figura 11-9.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2014-2015.	171
Figura 11-10.	Comportamiento del Material Particulado PM_{10} , Estación Ramada Años 2014-2015.	171

Lista de Mapas

Mapa 3-1.	Distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Colombia en el año 2015, incluyendo campañas.....	27
Mapa 6-1.	Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PST entre 2011 y 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia con representatividad temporal igual o superior a 75%. Promedios geométricos.....	51
Mapa 6-2.	Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CAR y SDA (entre 2011 y 2015) y AMVA (Itagüí) entre 2012 y 2015 con una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.....	52
Mapa 6-3.	Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CORPAMAG y CORPOCESAR entre 2011 y 2015 que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.....	53
Mapa 6-4.	Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones del SVCA de CORPOGUAJIRA (para 2011, 2012, 2014 y 2015) que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.....	54
Mapa 6-5.	Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ entre los años 2011 y 2015 para las estaciones que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.	70
Mapa 6-6.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CORANTIOQUIA y CORNARE (arriba, 2011 a 2015), y CDMB (abajo, 2011 a 2014) que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.	71
Mapa 6-7.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CVC y DAGMA (arriba) y SDA (abajo), que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.	72
Mapa 6-8.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ de los SVCA de CAR y CORPAMAG entre 2011 y 2015 para las estaciones que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.	73
Mapa 6-9.	Concentraciones promedio anuales de PM ₁₀ de las estaciones del SVCA de la Zona Minera del Cesar (arriba, 2011 a 2015) y CORPOGUAJIRA (2011, 2012, 2014 y 2015) que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.	74
Mapa 6-10.	Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} entre los años 2011 y 2015 para las estaciones que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.	90
Mapa 6-11.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} para las estaciones de los SVCA de AMVA y CORANTIOQUIA (arriba, 2011 a 2015) y CARDER y CORPOCALDAS (abajo; 2011, 2012 y 2014) que tienen una representatividad temporal igual o mayor a 75%.	91
Mapa 6-12.	Concentraciones promedio anuales de PM _{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de la Zona Minera del Cesar (arriba) y de la ciudad de Bogotá (abajo) que tienen una representatividad temporal igual o mayor a 75%.	92
Mapa 6-13.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2015. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m ³	107
Mapa 6-14.	Número de días de excedencias de O ₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA (arriba; 2011, 2013, 2014 y 2015) y SDA (abajo; 2011 a 2015) que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m ³	108

Mapa 6-15. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de CDMB (2011 y 2012) y DAGMA (2015) que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m³. 109

Mapa 6-16. Concentraciones promedio anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de AMVA, CAR, CDMB, CORANTIOQUIA, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%..... 116

Mapa 6-17. Concentraciones promedio anuales de NO₂ para las estaciones de los SVCA de AMVA y CORANTIOQUIA (arriba; 2011 a 2015) y CDMB (abajo; 2011 y 2012) que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%..... 117

Mapa 6-18. Concentraciones promedio anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de CAR (arriba) y SDA (abajo) que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%. 118

Mapa 6-19. Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. 125

Mapa 6-20. Concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de CDMB (arriba) y SDA (abajo) que cumplieron con el criterio de representatividad temporal de 75%. 126

Lista de Tablas

Tabla 3-1.	Número de equipos por contaminante y total de estaciones de monitoreo para los SVCA de Colombia que operaron en 2015. Se incluyen campañas.	28
Tabla 3-2.	Número de equipos por variable meteorológica y total de estaciones de monitoreo para los SVCA de Colombia que operaron en 2015. Se incluyen campañas.	29
Tabla 4-1.	Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio establecidos en la Resolución 610 de 2010.	35
Tabla 5-1.	Clasificación de las autoridades ambientales que administran SVCA en Colombia según el cumplimiento del criterio de representatividad temporal de mínimo 75%. Se incluye el número de equipos de cada grupo de autoridades, así como el porcentaje con respecto al total existente. Año 2015.	40
Tabla 6-1.	Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire (ICA) de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).	42
Tabla 6-2.	Lista de episodios de contaminación por ozono en los cuales la categoría de ICA correspondió a "Dañina a la salud para grupos sensibles" en un tiempo de exposición de 1 hora.	100
Tabla 11-1.	Estaciones de Monitoreo de calidad del aire 2011-2015.	164
Tabla I-1.	Factores de conversión de unidades para contaminantes criterio gaseosos a condiciones de referencia correspondientes a 25°C y 760 mm Hg.	178
Tabla II-1.	Nombres y abreviaturas de las estaciones del SVCA del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.	179

1. Introducción

Una de las principales preocupaciones sobre la contaminación atmosférica se asocia con los efectos en la salud humana a corto y a largo plazo; de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el aire limpio es un requerimiento esencial para la salud humana y el bienestar de la población (Organización Mundial de la Salud, 2006). Los estudios realizados en los últimos años demuestran que el deterioro de la calidad del aire es una de las causas de mortalidad y morbilidad y al respecto se conoce un amplio rango de efectos adversos que varían de acuerdo con el tipo de contaminante, su concentración, la duración de la exposición y el estado general de los individuos expuestos. Entre estos se encuentran las enfermedades cardiovasculares y respiratorias, las cuales se manifiestan especialmente en grupos vulnerables que incluyen personas con condiciones asociadas preexistentes, los niños y los adultos mayores.

El presente documento es un informe de los niveles de las concentraciones de siete contaminantes atmosféricos entre los años 2011 y 2015: Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado Menor a 10 micras (PM_{10}), Material Particulado Menor a 2,5 Micras ($PM_{2.5}$), Ozono (O_3), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Azufre (SO_2), los cuales fueron monitoreados en Colombia por veintiún Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) y se encuentran regulados por la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial como contaminantes criterio, es decir, aquellos que son regulados con base en suficiente evidencia científica de sus efectos en la salud. Es importante mencionar que los datos que fueron considerados para los análisis fueron aquellos cargados al subsistema SISAIRES por las autoridades ambientales administradoras de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. La descarga de la base de datos para realizar los análisis se realizó el 9 de septiembre de 2016.

El segundo capítulo presenta el marco conceptual de generación de este documento en el cual se describen las fuentes de información necesarias para el análisis, la gestión realizada por el IDEAM con las autoridades ambientales administradoras de los SVCA y el proceso lógico mediante el cual se obtuvieron y analizaron los resultados. El tercer capítulo muestra la evolución del monitoreo de la calidad del aire en Colombia desde sus orígenes hasta su estado actual, presentando las características de los SVCA, los contaminantes monitoreados y las tecnologías de medición de sus respectivas estaciones. El cuarto capítulo da una breve exposición de los contaminantes analizados y de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010. El quinto capítulo presenta un análisis de la cobertura temporal de las mediciones de los SVCA, donde se evidencia la gestión que realizan las autoridades ambientales con miras a obtener una cobertura suficiente de las mediciones durante el año, lo que es un factor crítico en la determinación del nivel de oferta de la información.

El sexto capítulo corresponde a la presentación del estado de la calidad del aire en Colombia entre 2011 y 2015 para cada uno de los contaminantes criterio. Los resultados incluyen la evaluación de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010, la presentación y análisis de las tendencias espaciales y temporales de las concentraciones, la comparación con los hallazgos plasmados en el informe de la vigencia 2007 – 2010 y el comportamiento del Índice de Calidad del Aire (ICA), el cual relaciona directamente las concentraciones de los contaminantes criterio con efectos en la salud de la población.

El séptimo capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del cruce de información de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos con variables meteorológicas, específicamente velocidad y dirección del viento, para estaciones selectas que tienen una oferta de información suficiente. Los resultados obtenidos proporcionan una aproximación de la caracterización del origen, destino y variabilidad de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la zona de influencia de una estación determinada.

El octavo capítulo corresponde a una aproximación inicial en el tema de salud ambiental en el cual se expone un análisis comparativo entre las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} con número de personas atendidas por Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) para cinco ciudades que cuentan con información suficiente. Este trabajo fue desarrollado como un esfuerzo colaborativo entre la Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM, y la Subdirección de Salud Ambiental y la Dirección de Epidemiología y Demografía del Ministerio de Salud y Protección Social. Es importante aclarar que este trabajo es un diagnóstico preliminar que debe profundizarse a futuro mediante la colaboración entre las dos entidades.

Las conclusiones generales son presentadas en el noveno capítulo, las cuales son seguidas por dos estudios de caso correspondientes a los capítulos décimo y undécimo que corresponden al episodio crítico de contaminación atmosférica del Área Metropolitana del Valle de Aburrá en marzo de 2016 y a la evolución del estado de la calidad del aire en la jurisdicción de CORPOBOYACÁ entre los años 2011 y 2015, respectivamente. Estas importantes contribuciones fueron proporcionadas al IDEAM por los profesionales de estas autoridades ambientales y son ejemplos importantes de la gestión de la calidad del aire a nivel regional.

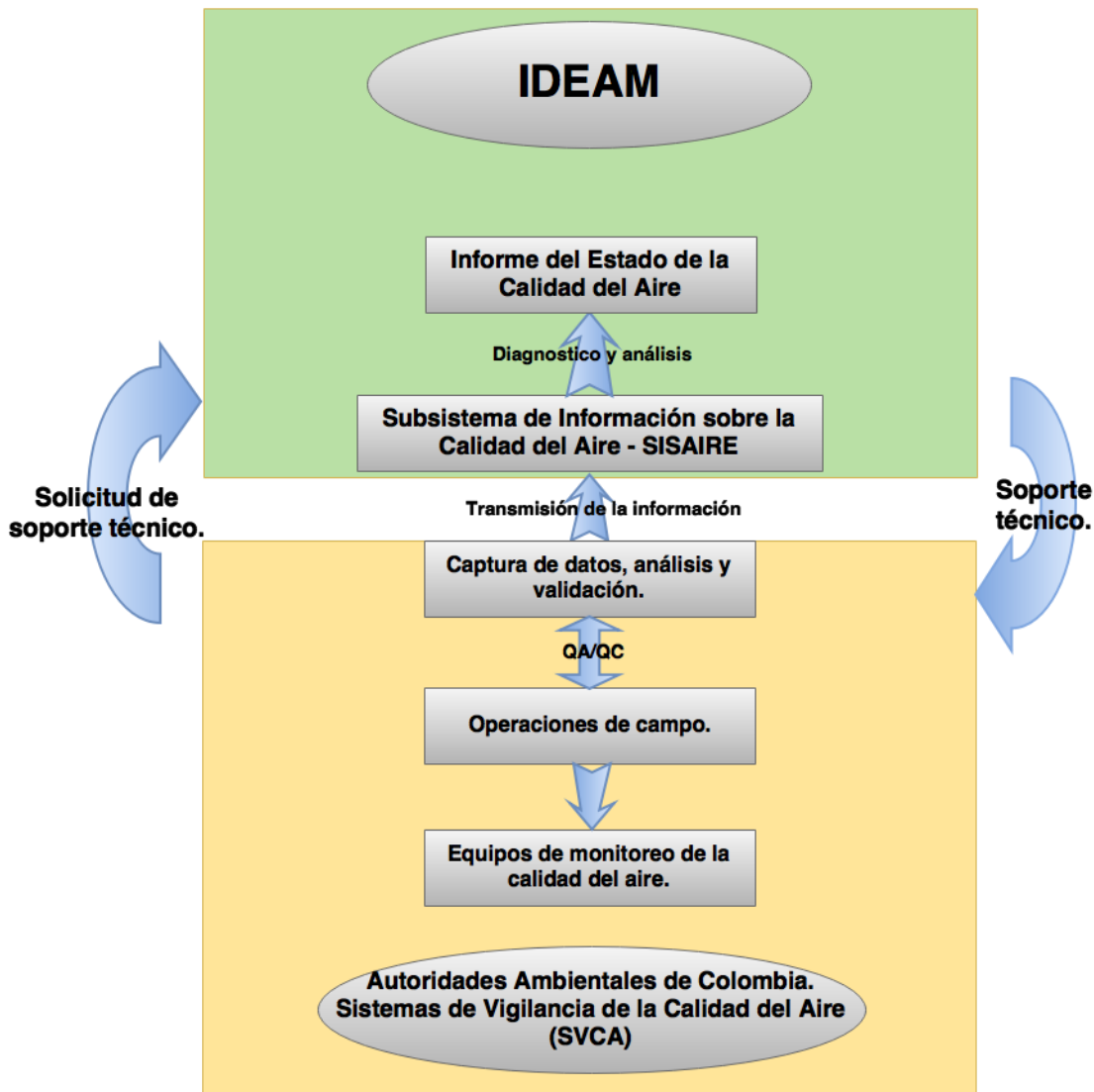
Finalmente, se proporciona un glosario de términos de algunos conceptos técnicos tratados en este documento, las referencias a fuentes externas y dos anexos que presentan los factores de conversión de unidades de concentración a las establecidas por la Resolución 610 de 2010 y por el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire; y los nombres completos correspondientes a las abreviaturas de los nombres de las estaciones del SVCA del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

2. Metodología

Los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos son monitoreados por los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire – SVCA, cuyo diseño y operación se rige por el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Las autoridades ambientales encargadas de la operación de estos sistemas velan por la correcta custodia, análisis y validación de los datos, así como del adecuado mantenimiento de los equipos de medición.

El IDEAM se encarga de realizar un acompañamiento técnico a la operación de estos SVCA y dentro de sus actividades se encuentra la gestión con las autoridades ambientales para el reporte oportuno de los datos en el subsistema SISAIRE. Una vez completada esta actividad, el Instituto realiza una segunda verificación de la información con base en criterios de calidad para analizar su consistencia y coherencia. Cuando se encuentran potenciales inconsistencias, el IDEAM realiza un reporte de observaciones y lo remite a la autoridad ambiental solicitando la revisión de la información solicitada y, en caso de ser necesario, su revalidación en SISAIRE.

Figura 2-1. Esquema de interacciones del IDEAM con las autoridades ambientales de Colombia respecto a la gestión de la información de calidad del aire para la elaboración del Informe del Estado de la Calidad del Aire 2011 – 2015.



La base de datos consolidada a partir de la gestión realizada por el IDEAM con las autoridades ambientales que operan SVCA fue analizada en una base de tiempo anual para el periodo de 2011 a 2015, para cada variable y estación de monitoreo; en otras palabras, el análisis se fundamentó en la evaluación inicial de series anuales, cuyos resultados permitieron la consolidación de información a mayores escalas temporales y espaciales, que permitieron evidenciar el panorama del estado de la calidad del aire en el país.

Una de las herramientas principales usadas en el procesamiento de la base de datos fue el lenguaje y entorno de programación R, el cual es un software libre diseñado especialmente para análisis gráfico y estadístico (R Core Team, 2016). La cantidad de datos a analizar requirió del desarrollo de códigos en este lenguaje que permitieron automatizar varias rutinas de cálculo que fueron aplicadas a cada una de las series anuales. Los paquetes más utilizados en el análisis fueron *openair* (Carslaw D. C., 2015) (Carslaw & Ropkins, 2012) y *ggplot2* (Wickham, 2009).

Los análisis realizados fueron divididos en cuatro corrientes principales: la primera se relaciona con la gestión de los entes locales y las características asociadas a los respectivos Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire; la segunda corresponde a la evaluación del cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; la tercera se relaciona con el tema de salud pública y evalúa las tendencias del Índice de Calidad del Aire (ICA); finalmente en la cuarta se analiza la evolución del estado de la calidad del aire año a año entre 2011 y 2015 y se hace la comparación de los resultados con los correspondientes al periodo 2007 – 2010, que corresponde al del anterior informe. A continuación se proporcionan detalles de la metodología aplicada a cada uno de los temas anteriormente citados.

La alta heterogeneidad en cuanto a las características de los SVCA de Colombia dificulta una evaluación comparativa del desempeño de los mismos, así como de la gestión realizada por los respectivos entes locales; por tanto, es recomendable caracterizar cada uno de forma independiente. Como aspectos importantes de estos sistemas se destaca el tipo de SVCA, el número de estaciones con que cuenta, su ubicación geográfica, el propósito de medición, las variables monitoreadas y las tecnologías de medición que utiliza.

La evaluación de la gestión se realiza desde el punto de vista de la cobertura espacial y de la cobertura temporal. La primera identifica el área de influencia de las estaciones, lo cual se asocia a su número y sectores monitoreados. Por otro lado, la segunda se relaciona con la representatividad temporal de los datos, un criterio de calidad que indica el número total de datos válidos con respecto al total posible en el año. De acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT, se debe cumplir con mínimo 75% de los datos válidos para que los respectivos promedios sean representativos del periodo a analizar ya sea un día, un mes, un trimestre, un año, etc. En el caso concerniente a este informe, se tomarán bases de tiempo anuales para los respectivos análisis.

En el cálculo de la representatividad temporal es importante destacar que la estimación del número máximo posible de datos válidos en un año determinado para una serie de datos en particular depende de la tecnología de medición del respectivo equipo. En general se destacan equipos que tienen un tiempo de reporte horario, los cuales se consideran automáticos, y, por otro lado, los manuales y semiautomáticos que tienen un tiempo de medición diario o de 24 horas.

Como se ha mencionado previamente, los SVCA modifican sus características de monitoreo con el correr del tiempo en función de aspectos técnicos, tecnológicos, administrativos, logísticos y operativos. La evaluación de la gestión para cada entidad local involucra el análisis del cambio en la cobertura del monitoreo en los

años analizados, así como las razones asociadas. Este análisis se realiza a nivel nacional y para cada Autoridad Ambiental Urbana y Corporación Autónoma Regional.

El segundo tema general se relaciona con la evaluación del nivel de cumplimiento de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos con respecto a los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 en diferentes tiempos de exposición (ver sección de marco normativo). Los datos horarios obtenidos por los equipos automáticos permitieron realizar la comparación con los tiempos de exposición de 1 hora, 3 horas y 8 horas; estos dos últimos a manera de promedios móviles. Sin embargo, esto no es posible para los equipos manuales ya que su tecnología permite un tiempo de medición de mínimo 24 horas y, por tanto, comparaciones en tiempos de exposición superiores a este lapso. En el caso de los límites para un tiempo de exposición anual, se calcularon los respectivos promedios a partir de los datos diarios para realizar la comparación. Para los demás tiempos de exposición, se evaluó el porcentaje de excedencias en el año, el cual no se encuentra reglamentado, pero proporciona información importante con respecto al grado de incumplimiento y la comparación mutua de estaciones de un determinado SVCA.

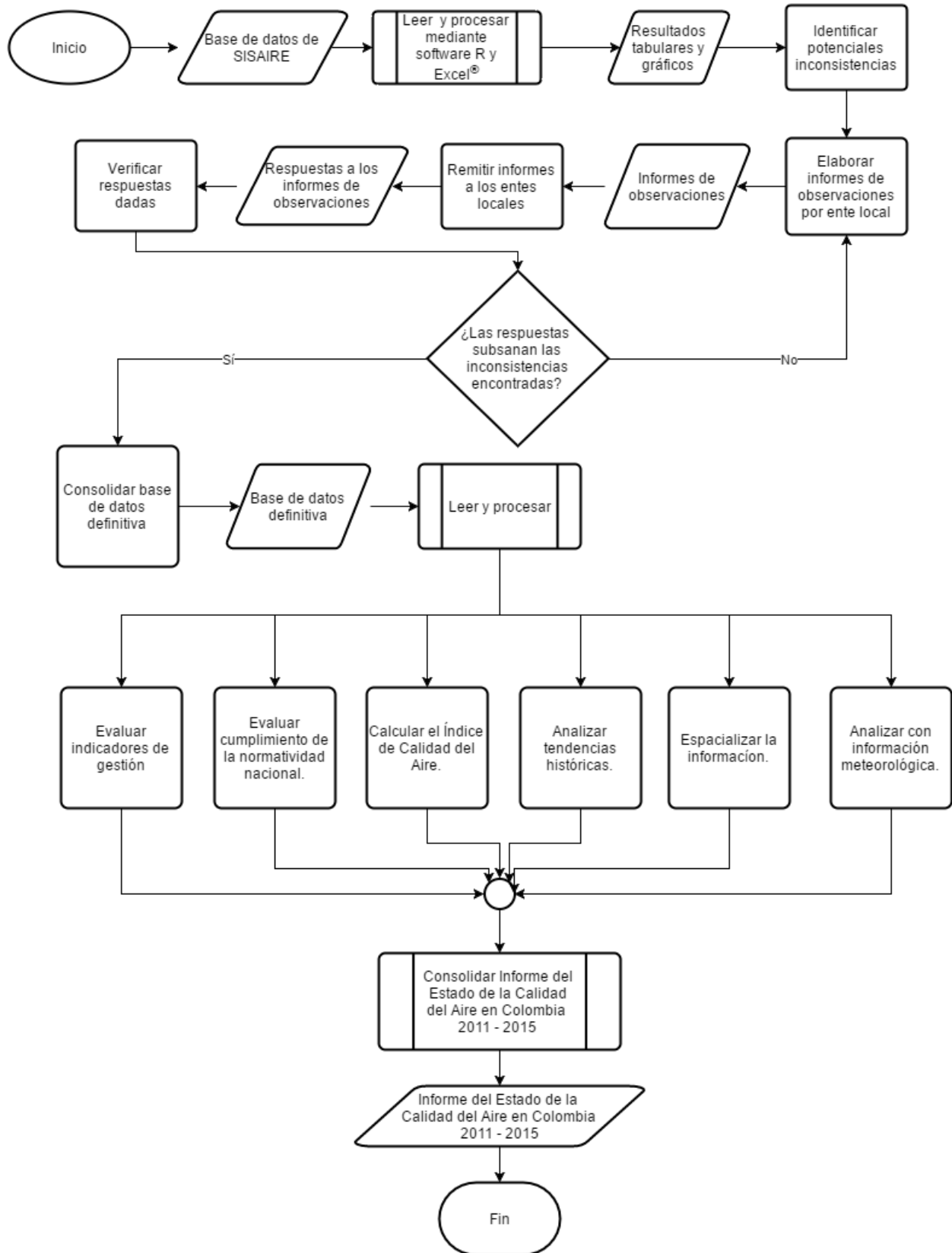
La evaluación de los efectos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la salud de la población fue realizada mediante el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA), que le asigna un color a la calidad del aire el cual depende de su grado de contaminación y presenta los efectos asociados en salud. El ICA está contemplado para seis contaminantes criterio (O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO , SO_2 y NO_2) en tiempos de exposición que oscilan entre 1 hora y 24 horas de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Se presenta en una escala que oscila entre 0 y 500 donde los valores más altos representan mayores niveles de contaminación atmosférica y, en consecuencia, más efectos potenciales y adversos a la salud de la población. Este rango se divide en seis categorías y son indicativas del estado general del aire teniendo en cuenta que el propósito principal del ICA es comunicar de una manera fácil y eficaz a la población sobre los efectos del estado de la calidad del aire en la salud.

Finalmente, con el objetivo de evaluar las tendencias a través de los años, se presenta un análisis de la evolución temporal de las concentraciones anuales de los contaminantes atmosféricos, así como de los niveles de excedencias de los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010. Esta evaluación es importante porque permite dar un diagnóstico del comportamiento interanual de la calidad del aire en los SVCA de manera que sea posible determinar la gestión que se está realizando en Colombia en pro de lograr un mejor estado del recurso. Como se mencionó previamente, en la comparación de tendencias entre entes locales es importante destacar que cada SVCA está sujeto a determinadas particularidades, tales como su objetivo de monitoreo, población y área cubierta, tecnología de medición, características de los alrededores de las estaciones, actividades económicas que se realizan dentro de su jurisdicción y condiciones meteorológicas, entre otras. Por tanto, se recomienda tomar en cuenta esta precaución al momento de formular conclusiones.

El análisis histórico compara las tendencias de la calidad del aire mediante dos enfoques. Inicialmente, en una base de tiempo anual se comparan las concentraciones anuales y los niveles de excedencias entre 2011 y 2015. Posteriormente, se analizan las tendencias generales de este periodo respecto a los resultados obtenidos en el análisis de la vigencia 2007 – 2010, la cual correspondió al periodo considerado en el pasado Informe del Estado de la Calidad del Aire.

La Figura 2-2 presenta el diagrama de flujo correspondiente a las actividades mencionadas en esta sección, desde la revisión de la base de datos cargada a SISAIRE hasta la elaboración del Informe del Estado de la Calidad del Aire 2011 – 2015.

Figura 2-2. Flujograma que describe la metodología de elaboración del Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia entre 2011 y 2015.



3. Evolución del monitoreo de la calidad del aire en Colombia

El interés en conocer el estado de la calidad del aire se remonta al año 1967, en el que por iniciativa de la Organización Panamericana de la Salud – OPS y por medio del Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), se puso en funcionamiento la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire – RED PANAIRES; esta red inicialmente contaba con ocho estaciones y se fue expandiendo de manera que a finales de 1973 contaba con 88 estaciones ubicadas en 26 ciudades de 14 países, de las cuales en Colombia había estaciones en Bogotá, Barranquilla, Bucaramanga, Cali, Cartagena y Medellín; esta red permaneció en operación hasta 1980 (Korc, 1999).

La evolución en el monitoreo avanzó simultáneamente con la expedición de la normatividad en el país; fue así como en 1973 se expidió la Ley 23 cuyo objetivo era *“Prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente y buscar el mejoramiento, conservación y restauración de los recursos naturales renovables, para defender la salud y el bienestar de todos los habitantes del territorio nacional”* (Ministerio de Salud Pública, 1973); en esta Ley se consideran como bienes contaminables el agua, el suelo y el aire.

Un año más tarde se promulgaría el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y Protección al Medio Ambiente (Decreto 2811 de 1974), el cual constituye la línea base de las políticas ambientales de Colombia.

En el año 1979 se promulgó la Ley 9 que facultó al entonces Ministerio de Salud a proferir las normas de emisión de sustancias contaminantes a la atmósfera, para la protección del recurso; en este sentido el Ministerio de Salud emitió el Decreto 02 de 1982 que fijó las normas de calidad del aire retomando las disposiciones del Decreto 2811 de 1974 y la Ley 9 de 1979.

Al contar con límites máximos permisibles para la emisión de contaminantes a la atmósfera, se reactivó la necesidad de monitorear la calidad del aire; dando respuesta a esta necesidad en 1983 se creó la Red Nacional de Vigilancia de la Calidad del Aire que contaba con más de 50 estaciones y estuvo en operación hasta 1990 (Cancino, 2006).

Si bien es cierto que hasta ese momento la responsabilidad del monitoreo de la calidad del aire se encontraba en el entonces Ministerio de Salud, con la expedición de la Ley 99 de 1993 se crea el Ministerio del Medio Ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental – SINA, que encarga a las autoridades ambientales, entre otras funciones, de ejercer la evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo, el aire y los demás recursos naturales renovables; estas funciones comprenden la expedición de las respectivas licencias ambientales, permisos, concesiones, autorizaciones y salvoconductos (Presidencia de la República, 1993).

Una vez creadas estas nuevas entidades y con la responsabilidad de evaluar la calidad del aire en su área de jurisdicción, se empezaron a organizar sus redes de monitoreo de la calidad del aire; para aquella época ya se encontraba en operación la red del Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA, seguida por la actual Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá – SDA y la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC.

La organización del sector ambiental en lo referente a la contaminación atmosférica continúa su consolidación con la expedición del Decreto 948 de 1995 que reglamenta la protección y control de la calidad del aire, las medidas para la prevención de la contaminación atmosférica, se establecen normas y principios para la atención de episodios de contaminación de aire generados por fuentes fijas y móviles, así como las normas básicas para la fijación de los estándares de emisión de contaminantes a la atmósfera, la emisión de ruido y olores ofensivos. (Presidencia de la República, 1995).

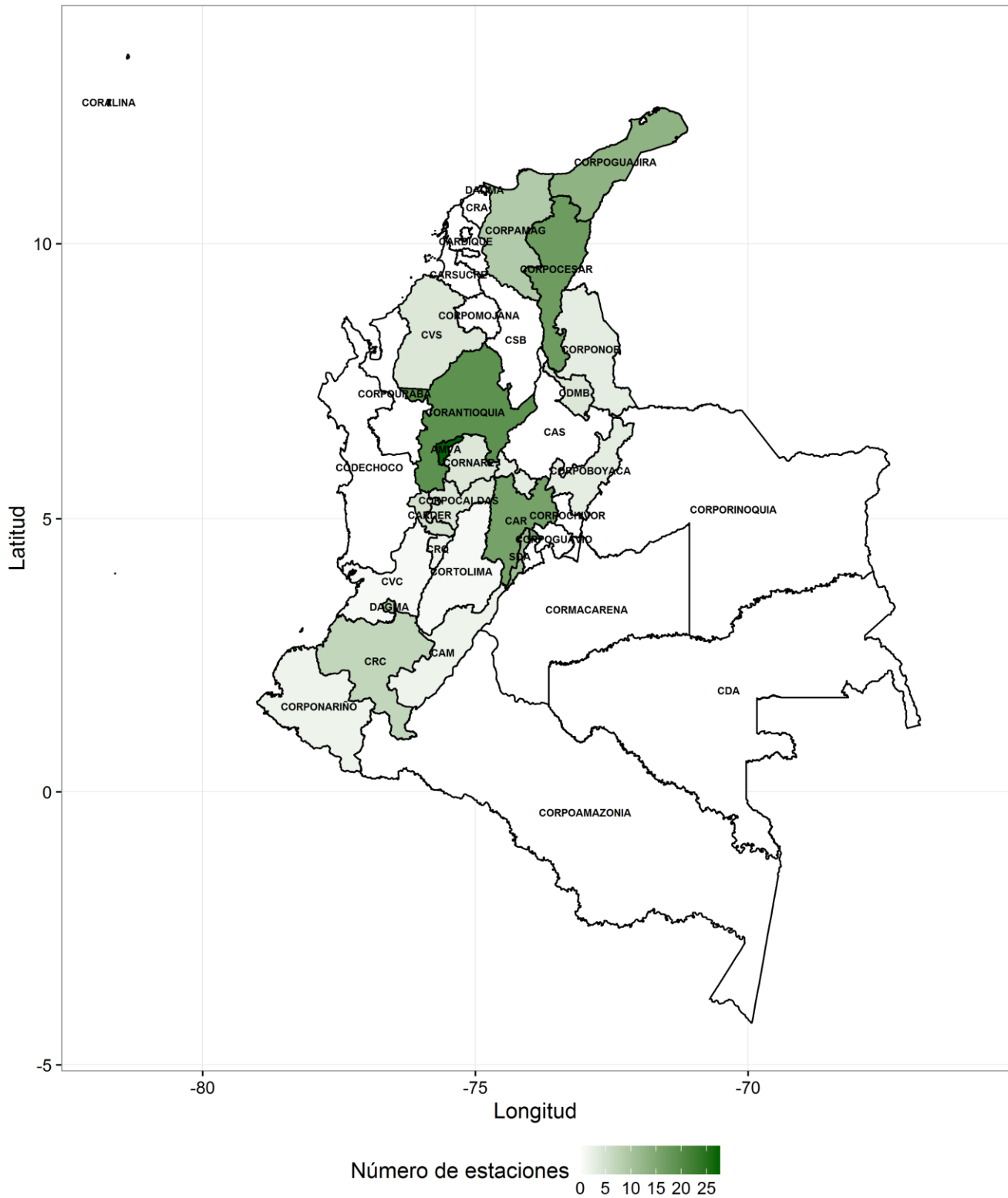
Es así como en los últimos quince años la normatividad referente a calidad del aire ha continuado su evolución; a la fecha se cuenta con normas específicas para calidad del aire, fuentes fijas, fuentes móviles, así como con protocolos que dan las directrices para el monitoreo y seguimiento de cada uno de los tipos de fuentes de emisión. De la mano con esta evolución, en el país han crecido las redes de monitoreo y sus respectivos Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire; para el año 2010 se contaba con 137 estaciones de monitoreo de la calidad del aire operadas por 19 autoridades ambientales, mientras que a diciembre de 2015 reportaron al SISAIRE 163 estaciones operadas por 21 autoridades ambientales, que se encuentran distribuidas a lo largo del territorio nacional tal como se muestra en el Mapa 3-1 y en la Tabla 3-1 para contaminantes atmosféricos y en la Tabla 3-2.

Es importante destacar que algunas estaciones no son permanentes sino que corresponden a campañas de monitoreo llevadas a cabo en determinados sitios de interés. Este es el caso de las campañas llevadas a cabo por CORNARE y CORANTIOQUIA.

Los contaminantes que se monitorean en el país corresponden básicamente a los contaminantes criterio que se encuentran reglamentados en la Resolución No. 610 de 2010; en la Figura 3-1 se presenta el porcentaje de monitoreo de cada contaminante para el año 2010; la situación a diciembre de 2015 se presenta en la Figura 3-2.

Mapa 3-1. Distribución de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Colombia en el año 2015, incluyendo campañas.

Número de estaciones por autoridad ambiental. Año 2015



Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, 2016.

Tabla 3-1. Número de equipos por contaminante y total de estaciones de monitoreo para los SVCA de Colombia que operaron en 2015. Se incluyen campañas.

Autoridad Ambiental	Sigla	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}	PST	SO ₂	Total de estaciones
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	AMVA	5	8	9	17	11	1	1	27
Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena	CAM				2				2
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca	CAR	1	13		16		5		16
Corporación Autónoma Regional de Risaralda	CARDER				5		1		5
Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga	CDMB	2	2	1	3				4
Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia	CORANTIOQUIA		1	1	18	1			19
Corporación Autónoma Regional de las Cuencas de los Ríos Negro y Nare	CORNARE				4				4
Corporación Autónoma Regional del Magdalena	CORPAMAG				5		6		9
Corporación Autónoma Regional de Boyacá	CORPOBOYACA				3				3
Corporación Autónoma Regional de Caldas	CORPOCALDAS				3	1	2		4
Corporación Autónoma Regional del Cesar	CORPOCESAR				17	5	10		17
Corporación Autónoma Regional de La Guajira	CORPOGUAJIRA				13		3		13
Corporación Autónoma Regional de Nariño	CORPONARIÑO				1	1			2
Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental	CORPONOR				3				3
Corporación Autónoma Regional del Tolima	CORTOLIMA				1				1
Corporación Autónoma Regional de Cauca	CRC			5	7				7
Corporación Autónoma Regional del Quindío	CRQ				2				2
Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca	CVC				1	1			1
Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge	CVS				4				4
Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente	DAGMA		1	4	7	4		3	9
Secretaría Distrital de Ambiente	SDA	8	8	11	11	10	1	8	11

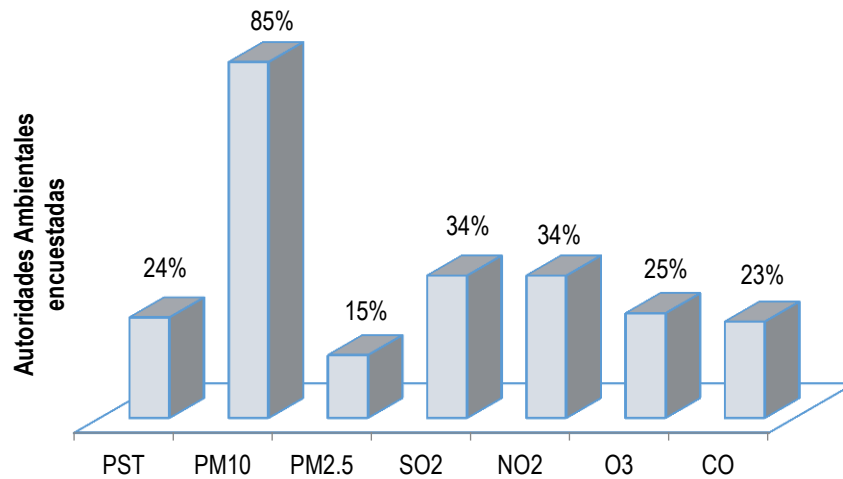
Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, 2016.

Tabla 3-2. Número de equipos por variable meteorológica y total de estaciones de monitoreo para los SVCA de Colombia que operaron en 2015. Se incluyen campañas.

Autoridad Ambiental	Sigla	Dir. Viento	Hum. Rel.	Precipitación	Presión Atm.	Rad. Solar	Temperatura	Vel. Viento	Total de estaciones
Área Metropolitana del Valle de Aburrá	AMVA	13	12	8	12	12	13	13	15
Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga	CDMB	1	1	2			2	2	2
Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia	CORANTIOQUIA			18				18	18
Corporación Autónoma Regional del Cesar	CORPOCESAR	5	5	5	5	3	5	5	5
Corporación Autónoma Regional de La Guajira	CORPOGUAJIRA		4	5			4	5	5
Corporación Autónoma Regional del Tolima	CORTOLIMA	1						1	1
Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente	DAGMA	3	4	4		2	2	3	4
Secretaría Distrital de Ambiente	SDA	11	6	11	3	4	10	11	11

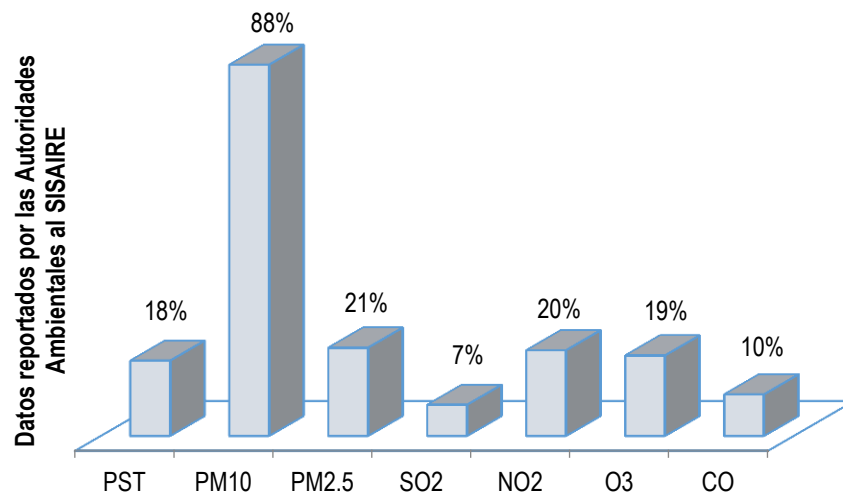
Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, 2016.

Figura 3-1. Participación porcentual de los contaminantes medidos por las autoridades ambientales en Colombia a diciembre de 2010.



Fuente: IDEAM, Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010, Bogotá D.C., 2012.

Figura 3-2. Participación porcentual de los contaminantes medidos por las autoridades ambientales en Colombia a diciembre de 2015.

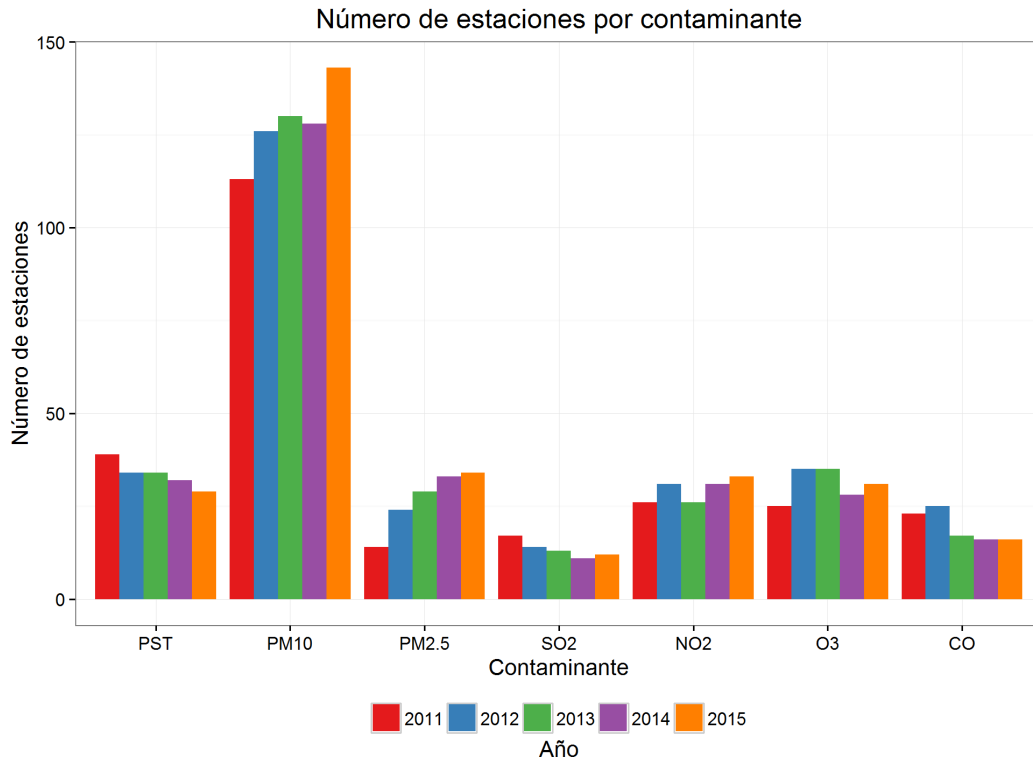


Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE, 2016.

El descenso en los porcentajes de monitoreo del dióxido de azufre-SO₂, dióxido de nitrógeno-NO₂, ozono-O₃ y monóxido de carbono-CO del año 2015 en comparación con el año 2010, se debe a que para este informe solamente se tuvieron en cuenta los datos válidos cargados por las autoridades ambientales al SISAIRE, mientras que para el informe pasado fue considerada la información de una encuesta aplicada a estas entidades.

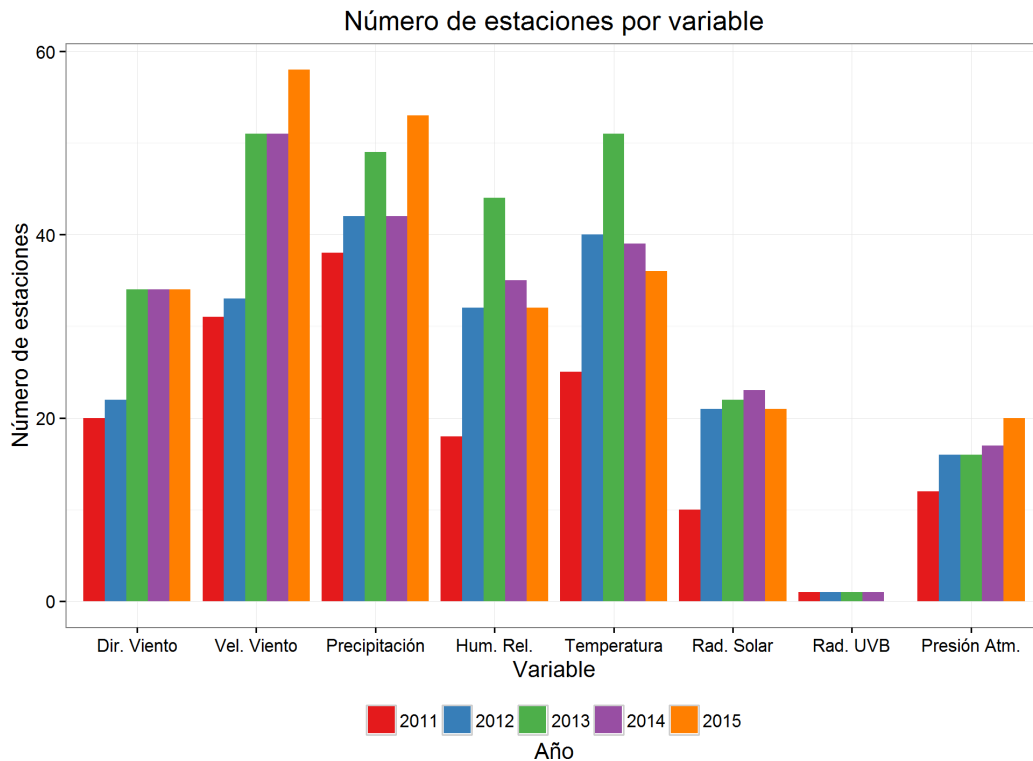
Vale la pena resaltar que en este informe es la primera vez que se presenta el análisis de los datos de PM_{2.5}, porque el número de estaciones que monitorean este contaminante ha venido creciendo. El comportamiento del número de estaciones que monitorearon cada uno de los contaminantes durante el período 2011-2015 se presenta en la Figura 3-3. La información correspondiente a las variables meteorológicas se presenta en la

Figura 3-3. Número de estaciones que monitorearon los contaminantes criterio durante el período 2011-2015.



Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAI, 2016.

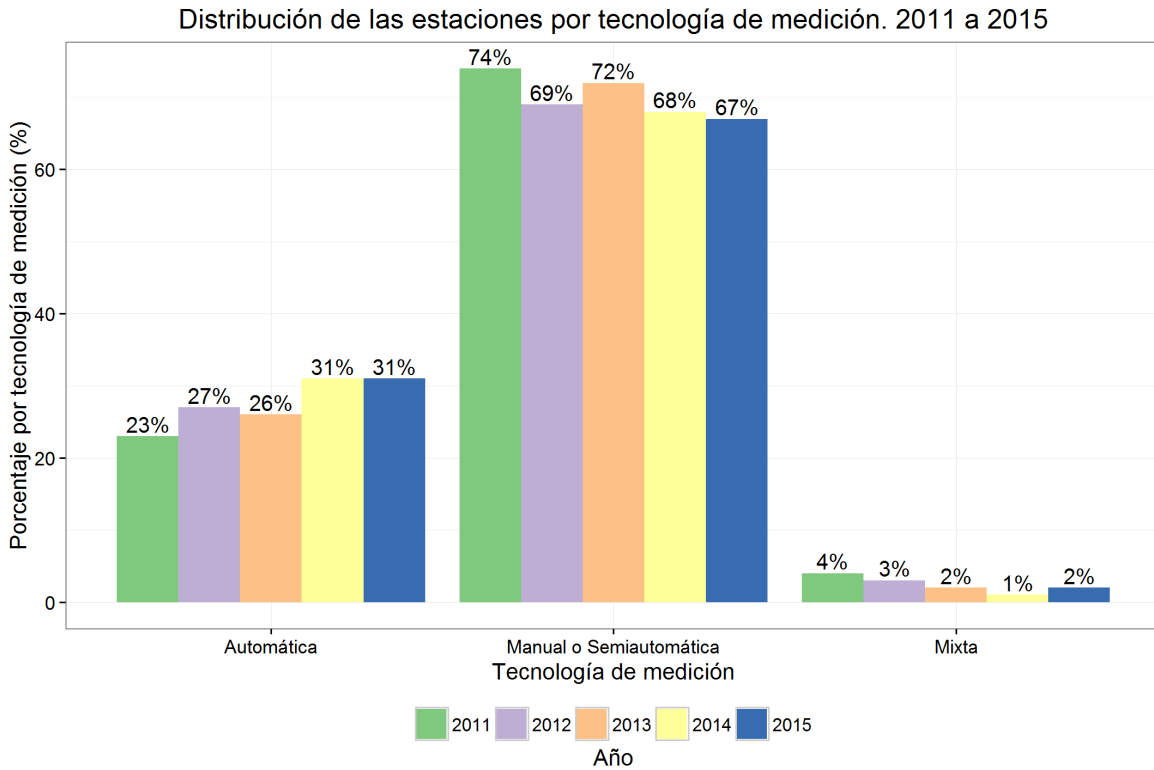
Figura 3-4. Número de estaciones que monitorearon variables meteorológicas durante el período 2011-2015.



Otro aspecto importante a tener en cuenta es el tipo de tecnología de medición con que cuentan las estaciones de monitoreo, el cual determina la oportunidad de la información, es decir, que se puedan tomar medidas oportunas cuando los niveles de contaminantes en el aire puedan generar problemas para la salud de la población; en este sentido los porcentajes de distribución de las estaciones por tipo de monitoreo entre 2011 y 2015 se presentan en la Figura 3-5.

De acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) los equipos manuales «recolectan las muestras de contaminantes por métodos físicos o químicos para un posterior análisis en laboratorio», los equipos semiautomáticos «son muestreadores activos a los que se les han incorporado sistemas electrónicos para mejorar la calidad y despejar la incertidumbre en las mediciones» y, los equipos automáticos «pueden proporcionar mediciones de tipo puntual con alta resolución (promedios horarios o cada 10 minutos), para la mayoría de los contaminantes criterio [...]. Estas muestras pueden ser analizadas en línea usualmente por métodos electro-ópticos (Absorción UV, Infrarrojo no dispersivo, fluorescencia o quimioluminiscencia) y los datos pueden ser transmitidos en tiempo real». Las estaciones que se clasifican en una categoría mixta contienen equipos manuales o semiautomáticos y automáticos.

Figura 3-5. Porcentaje de distribución de las estaciones por tecnología de medición durante el período 2011-2015.



Fuente: IDEAM, Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAI, 2015.

Como se aprecia en la figura, el porcentaje de estaciones manuales ha disminuido paulatinamente, mientras que para las estaciones automáticas el comportamiento ha sido creciente; el porcentaje de estaciones mixtas se ha mantenido relativamente constante. Sin distinción del tipo de estación de monitoreo con que cuenten los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire – SVCA, de acuerdo con lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo y seguimiento de la Calidad del aire se debe contar mínimo con el 75% de datos válidos, del número total de datos posibles.

4. Contaminantes criterio y norma de calidad del aire en Colombia

La norma de calidad del aire o nivel de inmisión en Colombia fue establecida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial – MAVDT (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS) mediante la Resolución 610 de 2010, la cual modifica la Resolución 601 de 2006 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Dentro de ésta se consideraron los llamados contaminantes criterio, que se definen como aquellos para los cuales existen criterios basados en la afectación a la salud de la población, como fundamento para establecer niveles máximos permisibles en el aire ambiente (USEPA, 2015); a continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los contaminantes.

4.1. Material particulado

Es usualmente llamado PM (*particulate matter*) seguido por un número que indica el tamaño de las partículas en micrómetros. El material particulado fino, $PM_{2.5}$, corresponde a todas las partículas que tienen un tamaño menor a 2,5 micrómetros y el PM_{10} representa las partículas de tamaño menor a 10 micrómetros; esto significa que el $PM_{2.5}$ está contenido dentro del PM_{10} . A las partículas con tamaño entre 2,5 y 10 micrómetros se les conoce como material particulado grueso (WHO, 2006). Las Partículas Suspendidas Totales (**PST**) contienen al PM_{10} y a la fracción inhalable de diámetro mayor, que no sedimentan en periodos cortos sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad.

Numerosos estudios alrededor del mundo muestran un vínculo entre los niveles de material particulado en el aire ambiente y la morbilidad y mortalidad de la población. Tanto los tiempos cortos de exposición a PM como los largos están relacionados con índices de mortalidad (NILU, 2015).

Las fuentes más importantes de PM_{10} involucran procesos mecánicos como el desgaste del asfalto y de los neumáticos y frenos de los carros, los fenómenos de resuspensión, actividades de construcción, incendios forestales y las actividades industriales. En cuanto a las fuentes de $PM_{2.5}$ se encuentran los incendios forestales, las emisiones de escape de los vehículos y la industria (WHO - Regional Office for Europe, 2006).

En la mayoría de los ambientes urbanos se encuentra presente tanto el material particulado fino como grueso; sin embargo, la proporción relativa de estas dos categorías puede variar, dependiendo de la geografía local, de la meteorología y de las características de las fuentes de emisión (WHO - Regional Office for Europe, 2006).

4.2. Dióxido de azufre (SO_2)

Este gas incoloro se forma a partir de la combustión de sustancias que contienen azufre, principalmente petróleo y carbón, así como de numerosos procesos industriales. Las plantas de energía, las refinерías de petróleo y otros grandes complejos industriales son fuentes principales de las emisiones actuales de SO_2 (NILU, 2015). En ciertas regiones, la quema de carbón y el uso de gasolina y diésel con alto contenido de azufre son las mayores fuentes de emisión teniendo en cuenta que en la combustión, el azufre presente en el combustible se convierte casi en su totalidad a SO_2 (WHO - Regional Office for Europe, 2006).

4.3. Dióxido de nitrógeno (NO_2)

En un proceso paralelo al del SO_2 , el nitrógeno en los combustibles se convierte por combustión a altas temperaturas a óxidos de nitrógeno, NO_x , que corresponden a la suma de NO_2 y NO. El monóxido de nitrógeno (NO) se encuentra en mayor proporción entre los NO_x formados por esta ruta; en sí mismo no afecta a la salud en las concentraciones ambiente usuales, pero es oxidado rápidamente por el ozono troposférico disponible para formar una contribución adicional de NO_2 , que sí es dañino. Los efectos de la

exposición prolongada a NO_2 han sido investigados mediante estudios en la población; muchos muestran conexión con asma, bronquitis, afectación de la función pulmonar y mortalidad.

Las contribuciones más importantes a las emisiones de NO_x son las correspondientes a las del tubo de escape de los vehículos y a la generación eléctrica; algunos sitios también pueden ser focos de emisión debido a la actividad industrial. En las ciudades grandes los vehículos diésel emiten la mayor parte de NO_2 (NILU, 2015).

Cuando se encuentra en presencia de hidrocarburos y de radiación ultravioleta, el dióxido de nitrógeno es la fuente principal de ozono troposférico y de aerosoles de nitrato; estos últimos forman una contribución importante a la concentración ambiente de $\text{PM}_{2,5}$ (WHO, 2006) (USEPA, 2015).

4.4. Ozono (O_3)

Es un gas que no se emite directamente por fuentes primarias, se encuentra en la estratósfera (donde protege a la Tierra contra la dañina radiación ultravioleta) y cerca del nivel del suelo en la tropósfera. Se produce a partir de las reacciones fotoquímicas en presencia de radiación solar y precursores tales como los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) (USEPA, 2015), y se consume al reaccionar con NO_2 o ser depositado en el suelo (WHO, 2006). En el presente informe se hace referencia al ozono troposférico el cual conduce a efectos adversos para la salud

El ozono troposférico puede convertirse en un problema ambiental teniendo en cuenta que afecta la vegetación, la infraestructura y la salud de la población (NILU, 2015). Las medidas encaminadas a controlar sus niveles se enfocan en las emisiones de sus precursores (WHO, 2006).

4.5. Monóxido de carbono (CO)

Se forma a partir de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono tales como gasolina, diésel y madera. Este es un caso común donde una proporción del carbón se oxida solamente a monóxido de carbono, mientras que la combustión completa conduce a la formación de dióxido de carbono (WHO - Regional Office for Europe, 2006). En Colombia los niveles de CO son usualmente bajos y no representan riesgo a la salud de la población.

4.6. Norma de calidad del aire

Los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio a condiciones de referencia con sus respectivos tiempos de exposición se describen en la Tabla 4-1. Es importante destacar que de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, “*todas las variables de calidad del aire utilizan microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) como unidad de medida, exceptuando el monóxido de carbono que emplea miligramos por metro cúbico (mg/m^3)*” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Por esta razón, en las secciones posteriores se presentarán los resultados de CO en unidades de mg/m^3 .

Ciertas concentraciones cargadas al Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE por las autoridades ambientales que operan los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire, se encuentran en unidades que difieren de las establecidas en la normatividad nacional; por ejemplo, algunas concentraciones se reportan en partes por millón (ppm) y en partes por billón (ppb); en consecuencia, fue necesario aplicar a estos datos los factores de conversión correspondientes, que se obtienen a partir de la aplicación de la Ley de los Gases Ideales, tal como se describe en el Anexo 0.

Tabla 4-1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio establecidos en la Resolución 610 de 2010.

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO ₂	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 hora
O ₃	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 hora

En el presente informe se evaluaron los niveles de concentración y las tendencias de los contaminantes criterio que fueron monitoreados por las autoridades ambientales entre los años 2011 y 2015.

5. Análisis de la cobertura temporal de la información

La base de datos que se consolidó a partir de la gestión realizada con las autoridades ambientales fue el insumo para el análisis de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en los diferentes Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire - SVCA. Como un paso previo a la evaluación del estado de la calidad del aire, es importante evaluar la cobertura temporal de la información, es decir, la cantidad de datos disponible en cada uno de los años analizados; esta depende de factores técnicos, administrativos y logísticos y proporciona información relacionada con su oferta y calidad, la cual es complementaria con el análisis del estado del monitoreo en cuanto al número de estaciones, tecnología de medición y número de contaminantes.

5.1. Criterio de cobertura o representatividad temporal

Un conjunto de datos representativo del comportamiento de la calidad del aire de un año determinado, debe contar con una cobertura temporal mínima de 75% con respecto al total de datos posibles a medir, de acuerdo con lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. El número de datos a obtener para cumplir con este requerimiento depende de la tecnología de medición de los equipos (manual, semiautomática o automática) y del tiempo de exposición bajo el cual se evaluará el cumplimiento de la normatividad vigente y la afectación a la salud pública. Por ejemplo, para un equipo manual que tiene una frecuencia de medición de tres días, el máximo número de mediciones posibles a obtener en un año será de 121, de las cuales deben existir mínimo 91 datos para cumplir con este criterio de representatividad.

El análisis detallado de la información se basó en series anuales, que son conjuntos de datos característicos de un año, estación y contaminante en particular. La heterogeneidad entre las series es considerable y refleja la complejidad en cuanto a las características de los diferentes SVCA de Colombia. El tipo de SVCA, su tecnología de medición, su propósito y la gestión realizada por las autoridades ambientales en cuanto a la captura y validación de los datos, son factores determinantes en la representatividad temporal obtenida.

Para caracterizar temporalmente una serie de datos, es importante tener en cuenta el tiempo y la frecuencia de medición de los equipos; el primero hace referencia a la duración de la medición, mientras que el segundo corresponde al intervalo ocurrido entre la toma de dos muestras continuas. Para equipos automáticos, se reportan datos a la plataforma SISAIRES con un tiempo de medición y una frecuencia de una hora; sin embargo, los equipos manuales y semiautomáticos tienen un tiempo de medición de veinticuatro horas y una frecuencia de mínimo un día; esta última característica dificulta los análisis cuando se consideran tiempos de exposición a menores resoluciones temporales.

Teniendo en cuenta que el objetivo de este documento es presentar un informe sobre el panorama de la calidad del aire en Colombia entre 2011 y 2015, es necesario contar con información base representativa de cada año, que corresponde a todas las series anuales con una cobertura temporal igual o mayor a 75%; este hecho implica que los resultados que se presentan en el siguiente capítulo en cuanto a promedios, excedencias de los límites máximos permisibles, índices de calidad del aire, entre otros, corresponden a conjuntos de datos que cumplen este criterio.

Es importante destacar que los datos de las series anuales que no cumplen con la representatividad temporal requerida, pueden llegar a ser vitales con otros objetivos de evaluación que incluyen análisis más detallados en menores resoluciones temporales (semanas, meses, trimestres) y espaciales (por municipio, departamento o jurisdicción), identificación de la afectación a la calidad del aire cuando se presentan eventos de alta concentración y/o validación de los resultados dados por sistemas de modelación de la calidad del aire.

Los contaminantes criterio analizados fueron material particulado de tamaño menor o igual a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$) y menor a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}), partículas suspendidas totales (PST), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2). La validez de la información reportada en SISAIRE de estos contaminantes es responsabilidad primaria de cada una de las Autoridades Ambientales, de acuerdo con la Resolución 651 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010); sin embargo, el IDEAM identificó en un análisis posterior, posibles inconsistencias en los datos, las cuales fueron reportadas a manera de informes a las 21 Autoridades Ambientales que administran los SVCA. Dentro de las observaciones se realizó especial énfasis en los conjuntos de datos con representatividad temporal inferior a 75%.

5.2. Causas de la disminución de la representatividad temporal

Para poder tomar acciones que permitan mejorar la representatividad temporal de los datos, es importante saber cuáles fueron las razones que informaron las autoridades como causas del incumplimiento:

- Contratación de la operación de los SVCA con terceros, que puede ocasionar intermitencia en la operación.
- Falta de recursos para el mantenimiento de las estaciones generando fallas técnicas y operativas.
- Fallas técnicas de los equipos asociadas a su normal funcionamiento.
- Desinstalación de equipos o estaciones para ser trasladados a otra localización o para suspender definitivamente su operación debido a construcción de obras civiles en los predios donde se encuentran las estaciones, daños en las instalaciones eléctricas por estas mismas obras, retiro de la estación por decisión de los propietarios de los predios y/o por incumplimiento en los criterios de ubicación dados por el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.
- Entrada en operación de equipos en fechas posteriores al inicio del respectivo año, lo que implica ausencia de datos durante el periodo no muestreado.
- Datos correspondientes a campañas, en las cuales el monitoreo es temporal e inferior a un año, es decir, campañas de monitoreo que permiten el establecimiento de líneas base; para estos conjuntos de datos no es correcta la evaluación de la cobertura temporal en base anual al no requerirse el establecimiento de un SVCA con mediciones continuas.
- Identificación de tendencias incoherentes en los datos, los cuales se descartan en el proceso de validación.
- Pérdida de información por acciones de diagnóstico, puesta a punto de los equipos, mantenimientos preventivos y mantenimientos correctivos.
- Dificultad en la logística de operación teniendo en cuenta la extensión del área cubierta por cada SVCA, lo que repercute en inconvenientes del personal para visitar determinadas locaciones.
- Condiciones atmosféricas que influyen en el funcionamiento de los equipos.
- Inconvenientes relacionados con el suministro de energía a las estaciones.
- Siniestros en las estaciones causados por accidentes fortuitos.
- Dificultades asociadas con la seguridad que involucran vandalismo, hurto e inconvenientes para acceder a la estación.
- Uso de estaciones móviles que realizan monitoreos temporales en función de objetivos particulares previamente definidos o estudios específicos.
- Ausencia de personal capacitado para la validación, análisis y reporte de los datos, lo que influye en la pérdida de oportunidad para la detección temprana de tendencias inusuales asociadas a fallas en los equipos de monitoreo.

- Rotación continua de un mismo equipo de monitoreo por varias localizaciones durante periodos de tiempo definidos, con el objetivo de cubrir más zonas de la respectiva jurisdicción. El origen de esta causa está asociada fundamentalmente a la escasa disponibilidad de recursos para adquirir nuevos equipos.

5.3. Evaluación de la cobertura temporal de los datos de las autoridades ambientales

Teniendo en cuenta las consideraciones dadas, la Figura 5-1 presenta la proporción de series anuales de los SVCA analizados con una cobertura temporal igual o superior a 75% para cada año y contaminante, con respecto al total. Por otra parte, la Figura 5-2 presenta esta información para las variables meteorológicas. Para el caso de los contaminantes se observa que el año 2013 presentó la menor proporción de series representativas.

La evaluación de este indicador al nivel de las autoridades ambientales se realizó por medio de una clasificación de las mismas en función de la cobertura temporal de sus datos, como lo muestra la Tabla 5-1 para el año 2015. Una categoría *buena* implica que una gran proporción de las series anuales presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%, lo que permite analizar la mayor parte de la información disponible; la categoría *aceptable* indica que, aunque varias series son representativas para el análisis, existe un número no despreciable que no cumple este criterio; finalmente, la clasificación *baja* muestra ausencia de representatividad temporal en la mayoría de las series. Para la evaluación de este criterio se excluyen las autoridades ambientales que administran SVCA de Tipo I Indicativo, los cuales no monitorean de forma permanente.

Es importante destacar y reafirmar que los 21 SVCA analizados tienen diferencias significativas en cuanto a sus características, lo cual se ve reflejado en el hecho de que el número de estaciones y de equipos varía significativamente en cada uno. Con el objetivo de eliminar un posible sesgo en las conclusiones que pueden formularse al totalizar el número de autoridades ambientales asociadas a cada una de las categorías, se incluye adicionalmente el número de equipos. Se observa que, aunque la categoría baja corresponde al mayor número de autoridades ambientales, no necesariamente corresponde a la cantidad más alta de equipos ya que estos representan el 16% del total. Además, el grado de representatividad temporal puede variar en función del contaminante a analizar.

Como se mencionó antes, algunos SVCA no realizan monitoreo continuo, sino que se basan fundamentalmente en los resultados de campañas de monitoreo para obtener una línea base del estado de la calidad del aire de los sitios donde se realizan las mediciones. Este es el caso de CORANTIOQUIA, donde cada año se llevan a cabo campañas de monitoreo de máximo 30 días en ciertos municipios de su jurisdicción con poblaciones menores a 50.000 habitantes en donde, de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, no se requiere de un SVCA continuo. CORNARE posee un SVCA de tipo indicativo donde los municipios de su jurisdicción no superan los 150.000 habitantes; de acuerdo con esto, realizan monitoreos indicativos o campañas de una duración de máximo 3 meses. La CRC igualmente realiza campañas de monitoreo por periodos mensuales en sitios variables ya que no cuenta con un SVCA con equipos fijos; sin embargo, al ser la población de Popayán mayor a 150.000 habitantes, es necesaria la implementación de un SVCA de tipo básico con monitoreo permanente.

Figura 5-1. Proporción de series anuales de los SVCA con una cobertura temporal igual o superior a 75% con respecto al total para cada año y contaminante.

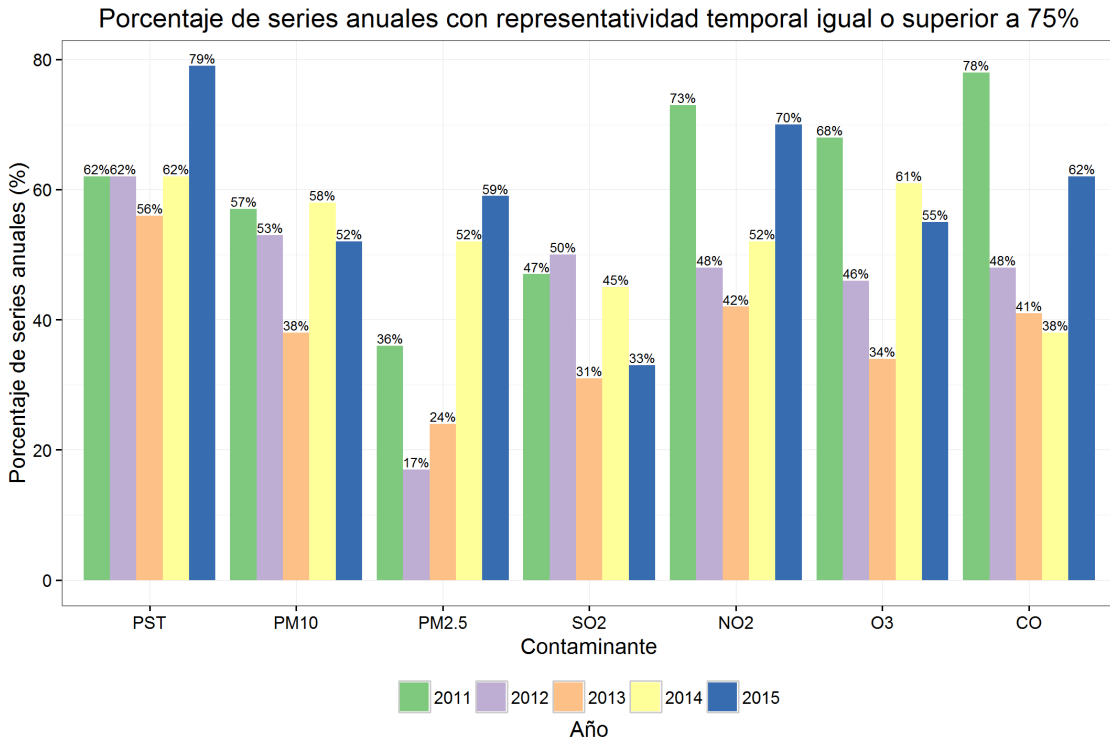


Figura 5-2. Proporción de series anuales de los SVCA con una cobertura temporal igual o superior a 75% con respecto al total para cada año y variable meteorológica.

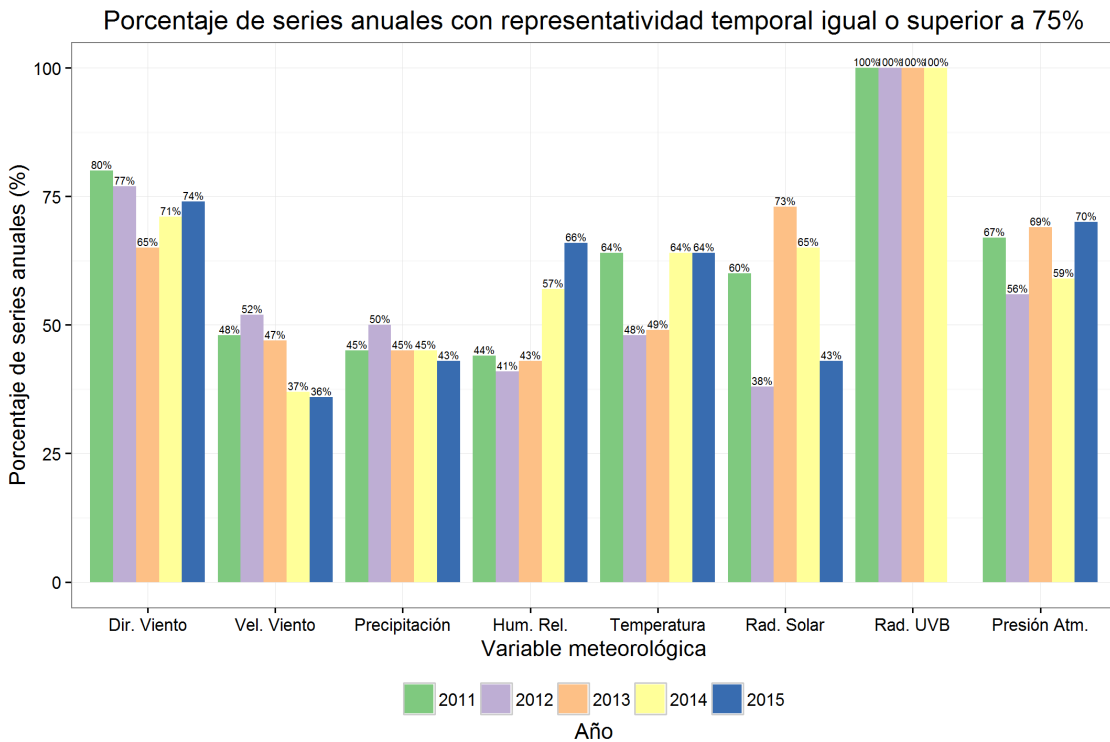


Tabla 5-1. Clasificación de las autoridades ambientales que administran SVCA en Colombia según el cumplimiento del criterio de representatividad temporal de mínimo 75%. Se incluye el número de equipos de cada grupo de autoridades, así como el porcentaje con respecto al total existente. Año 2015.

Clasificación	Autoridades Ambientales	Número de equipos	Porcentaje respecto al total de equipos
Buena	AMVA, CAR, CORPAMAG, CORPOCESAR, CORPOGUAJIRA, CORPONARIÑO, CORTOLIMA, SDA.	240	77%
Aceptable	CRQ, DAGMA	22	7%
Baja	CAM, CARDER, CDMB, CORPOBOYACÁ, CORPOCALDAS, CORPONOR, CRC, CVC, CVS	50	16%

6. Estado de la calidad del aire en Colombia entre los años 2011 y 2015

En este capítulo se presentan los resultados del análisis del estado de la calidad del aire en Colombia entre los años 2011 y 2015 para los siete contaminantes criterio contemplados en la Resolución 610 de 2010 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Está dividido en siete secciones, una para cada contaminante, las cuales mostrarán la evaluación del cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos, el análisis de las tendencias interanuales, la representación espacial (promedios o días de excedencias) mediante mapas y el comportamiento del Índice de Calidad del Aire (ICA).

En todos los casos, los análisis corresponden a aquellas series anuales que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75% con respecto al máximo número de datos válidos posibles en cada año. Este límite fue establecido de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

El cumplimiento de los límites máximos permisibles para tiempos de exposición inferiores al anual fue evaluado con base en el número de días al año que los superan por estación, es decir, las excedencias a la norma. Aunque la Resolución 610 de 2010 no contempla un número máximo permitido de días en los cuales se pueden exceder estos umbrales para afirmar un incumplimiento, es posible realizar la comparación mutua de las estaciones de un mismo SVCA y determinar las zonas más críticas que se encuentran afectadas por contaminación atmosférica en los diferentes años.

La representación espacial de las concentraciones promedio anuales y de los días de excedencias facilita la comprensión del estado y la evolución de la calidad del aire en diferentes zonas del país. Cada uno de los mapas representa la evolución de la variable analizada entre 2011 y 2015, siempre y cuando se cumpla el criterio de representatividad temporal de las series anuales.

La evaluación de los efectos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos en la salud de la población fue llevada a cabo mediante el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA), que le asigna un color a la calidad del aire el cual depende de su grado de contaminación y presenta los efectos asociados en salud; el ICA está contemplado para seis contaminantes criterio (O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO , SO_2 y NO_2) en tiempos de exposición que oscilan entre 1 hora y 24 horas de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Se presenta en una escala que oscila entre 0 y 500 donde los valores más altos representan mayores niveles de contaminación atmosférica y, en consecuencia, más efectos potenciales y adversos en la salud de la población. Este rango se divide en seis categorías que son indicativas del estado general del aire teniendo en cuenta que el propósito principal del ICA es comunicar de una manera fácil y eficaz a la población sobre los efectos del estado de la calidad del aire sobre su salud.

La comparación de las tendencias de las concentraciones entre los periodos 2007 a 2010 y 2011 a 2015 se realizó por Autoridad Ambiental, contaminante y estación. Es importante tener en cuenta que en algunos casos existen limitaciones en la disponibilidad de la información que dificultaron la comparación teniendo en cuenta que la configuración de los SVCA no es estática en el tiempo. El análisis histórico de las tendencias de $PM_{2.5}$ no es factible debido a que este contaminante no fue considerado en el informe de la vigencia pasada (IDEAM, 2012) debido a la escasa disponibilidad de datos. Los detalles gráficos de la vigencia anterior pueden consultarse en el respectivo informe que se encuentra disponible en línea en la página web del IDEAM¹.

¹ <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022433/CALIDADDELAIREWEB.pdf>

La Tabla 6-1 presenta los puntos de corte del Índice de Calidad del Aire (ICA) de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Con excepción de las Partículas Suspendidas Totales, las concentraciones de cada uno de los contaminantes criterio establecidos por la Resolución 610 de 2010 fueron evaluadas en función de estos puntos de corte con el objetivo de determinar la afectación potencial de estas a la salud de la población. Para cada SVCA se presenta la contribución porcentual de las categorías contempladas en este índice por estación y año, con respecto al número total de datos.

Tabla 6-1. Puntos de corte del Índice de Calidad del Aire (ICA) de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O ₃ 8h ppm	O ₃ 1h ppm (1)	PM ₁₀ 24h µg/m ³	PM _{2.5} 24h µg/m ³	CO 8h ppm	SO ₂ 24h ppm	NO ₂ 1h ppm
0 - 50	Verde	Buena	0,000 - 0,059	-	0 - 54	0,0 - 15,4	0,0 - 4,4	0,000 - 0,034	(2)
51 - 100	Amarillo	Moderada	0,060 - 0,075	-	55 - 154	15,5 - 40,4	4,5 - 9,4	0,035 - 0,144	(2)
101 - 150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles	0,076 - 0,095	0,125 - 0,164	155 - 254	40,5 - 65,4	9,5 - 12,4	0,145 - 0,224	(2)
151 - 200	Rojo	Dañina a la salud	0,096 - 0,115	0,165 - 0,204	255 - 354	65,5 - 150,4	12,5 - 15,4	0,225 - 0,304	(2)
201 - 300	Púrpura	Muy dañina a la salud	0,116 - 0,374 (0,155 - 0,404) (4)	0,205 - 0,404	355 - 424	150,5 - 250,4	15,5 - 30,4	0,305 - 0,604	0,65 - 1,24
301 - 400	Marrón	Peligrosa	(3)	0,405 - 0,504	425 - 504	250,5 - 350,4	30,5 - 40,4	0,605 - 0,804	1,25 - 1,64
401 - 500	Marrón	Peligrosa	(3)	0,505 - 0,604	505 - 604	350,5 - 500,4	40,5 - 50,4	0,805 - 1,004	1,65 - 2,04

- (1) Para O₃ se calculará el índice usando promedios de 8 horas y de 1 hora.
- (2) Para NO₂ se tendrán en cuenta valores únicamente por encima de 200 teniendo en cuenta que han sido tomados de valores y parámetros EPA.
- (3) Valores de concentraciones de 8 horas de ozono no definen valores más altos de ICA (≥ 301). Los valores de ICA de 301 o mayores serán calculados con concentraciones de 1 hora de ozono.
- (4) Los números entre paréntesis se asocian a valores de 1 hora que se utilizarán en esta categoría sólo si se superponen.

6.1. Partículas Suspendidas Totales (PST)

De acuerdo con lo establecido por la Resolución 610 de 2010, el límite máximo permisible de concentración para las Partículas Suspendidas Totales (PST) en un tiempo de exposición anual es $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en un tiempo de exposición diario es $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este contaminante representa la fracción gruesa del material particulado abarcando al PM_{10} y al $\text{PM}_{2.5}$. Según la Tabla 6-1, no existen rangos de concentración de PST establecidos para el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA), teniendo en cuenta que está contemplado para fracciones de menor tamaño como el $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , las cuales en consecuencia representan mayor potencial de afectación a la salud de la población.

6.1.1. Concentraciones promedio anuales

De acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) y con la Resolución 610 de 2010, las concentraciones anuales de PST se calculan a manera de promedios geométricos, que corresponden al antilogaritmo del promedio aritmético de los logaritmos de las concentraciones diarias. La ecuación de cálculo es:

$$C_{PG} = 10^{\left[\frac{\sum_{i=1}^n \log(C_i)}{n} \right]}$$

Donde C_{PG} es el promedio geométrico, que en este caso corresponde a la concentración anual de PST, y C_i representa cada una de las n concentraciones diarias.

La Figura 6-1 y la Figura 6-2 presentan las concentraciones promedio anuales de PST entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%. En esta figura, las estaciones fueron organizadas de mayor a menor concentración por cada Autoridad Ambiental, con el objetivo de mostrar de manera más clara las zonas en las cuales es más crítica la concentración de este contaminante.

Las excedencias del límite máximo permisible anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se concentraron en tres SVCA, específicamente en:

- **CORPAMAG:** estación INVEMAR en 2014 en la ciudad de Santa Marta.
- **CORPOCESAR:** la Loma Centro (años 2013 y 2014), La Jagua Centro (2015), Plan Bonito (2011 a 2013) y La Jagua Vía (2011, 2013 y 2015) de la Zona Minera del Departamento del Cesar.
- **SDA:** la estación Carvajal – Sevillana (2011, 2012, 2013 y 2015) de la ciudad de Bogotá, la cual es la única que monitorea PST en esta ciudad.

Las actividades propias de zonas con actividad minera y de grandes áreas urbanas contribuyen a que se presenten excedencias del límite establecido.

6.1.2. Tendencias entre 2011 y 2015

La evolución de las concentraciones promedio anuales para los SVCA de Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la jurisdicción de la CAR y Bogotá (SDA) se presenta en la Figura 6-3 mientras que las tendencias interanuales de los SVCA de (CORPAMAG), la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR) y la jurisdicción de CORPOGUAJIRA, ubicados en la Región Caribe de Colombia, se muestran en la Figura 6-4.

- **AMVA:** en la estación Colegio el Rosario – Itagüí (ITA – CRSV) se observa cumplimiento normativo entre los años 2012 y 2015. Para el año 2011 no se cuenta con información representativa.

- **CAR:** la heterogeneidad de los datos disponibles no permite establecer una tendencia generalizada de aumento o de disminución; sin embargo, en la estación Madrid – PTAR I se observa que las concentraciones de PST se redujeron en 2014 y 2015 en comparación con los niveles de 2011 y de 2012. Un caso similar se observa para Mosquera – Villa Deportiva.
- **SDA:** en Carvajal – Sevillana se observa un descenso progresivo de la concentración de PST en 2011, 2012, 2013 y 2015 pero excediendo en todo caso el umbral de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- **CORPAMAG:** con excepción de Aeropuerto y CAJAMAG, todas las estaciones muestran que sus concentraciones anuales de 2014 y 2015 (o 2013 en su defecto) fueron las más altas, evidenciando un deterioro progresivo de la calidad del aire en relación a este contaminante en las zonas de influencia de estos sitios de medición.
- **CORPOCESAR:** las tendencias son mixtas y se evidencia aumento progresivo de los niveles de concentración en La Jagua Centro, La Aurora y Rincón Hondo, pero descensos en las estaciones que han registrado las concentraciones más altas que son La Loma Centro y Plan Bonito. Para La Jagua Vía y El Hatillo se estaba presentando una tendencia de disminución, pero posteriormente las concentraciones aumentaron de forma abrupta para el año 2015.
- **CORPOGUAJIRA:** la disponibilidad de series anuales con cobertura temporal igual o superior a 75% no permite evidenciar una tendencia a largo plazo, con excepción de Cuestecitas, donde se observa un aumento progresivo de concentración entre 2011 y 2015. En Barrancas y Pacharoca los promedios anuales de 2015 disminuyeron levemente en comparación con el año 2014 y Patilla donde los datos de 2011 y 2012 sugieren un descenso, pero la ausencia de promedios entre 2013 y 2015 no permiten reforzar esta observación.

6.1.3. Comparación con las tendencias en el periodo 2007 – 2010

La comparación de las tendencias del periodo 2011 – 2015 respecto al periodo 2007 – 2010 muestra los siguientes resultados:

- **CORPAMAG:** los niveles de concentración en el periodo 2011 – 2015 disminuyeron y registraron menores excedencias del límite máximo permisible anual para las estaciones Aeropuerto, CAJAMAG y Centro Ejecutivo. Sin embargo, se observa que la tendencia de disminución entre 2007 y 2010 se invierte en esta última y en Alcatraces, Batallón y Don Jaca. INVEMAR continúa registrando concentraciones anuales cercanas al umbral de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.
- **CORPOCESAR:** La Loma Centro, Plan Bonito y La Jagua Vía continúan siendo las estaciones con las concentraciones anuales más altas de PST, las cuales han disminuido, pero aún exceden el límite máximo permisible. La Jagua Centro continúa su aumento progresivo de concentración mientras que Rincón Hondo y La Aurora rompieron la tendencia de disminución que mantuvieron entre 2008 y 2010, y en La Loma 2 se mantuvo la tendencia de reducción de 2009 a 2014, la cual fue interrumpida en 2015.
- **CORPOGUAJIRA:** los niveles de concentración en el periodo 2011 – 2015 en general disminuyeron para las estaciones Fonseca y Patilla; sin embargo, las concentraciones en Cuestecitas han estado en aumento tomando como base el nivel del año 2010.

Para AMVA, CAR y SDA no fue posible realizar esta comparación debido a que no se dispone de resultados para el periodo 2007 – 2010.

6.1.4. Excedencias del límite máximo permisible diario

El límite máximo permisible diario de $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ fue excedido en la Zona Minera del Cesar (CORPOCESAR) entre 2011 y 2015 y en Bogotá (SDA) en el año 2011; sin embargo, el número de días de excedencias en la primera región es significativamente mayor. La Figura 6-5 presenta el comportamiento de esta variable entre 2011 y 2015 para CORPOCESAR. Inmediatamente se observa que Plan Bonito representa una situación particular entre 2011 y 2013 al ser este número notablemente mayor en comparación con las demás estaciones, lo cual indica que se debe prestar especial atención a la actividad desarrollada en su zona de influencia; sin embargo, es importante destacar el descenso significativo del número de días de excedencias en el año 2014 y su ausencia en 2015. Por su parte, Carvajal – Sevillana de la SDA presentó un único día de excedencia en 2011 lo cual demuestra que el incumplimiento del límite anual se debe a que constantemente se registran concentraciones sobre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero inferiores a $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.1.5. Mapas de las concentraciones promedio

La distribución espacial de los promedios de PST se presenta en el Mapa 6-1 para Colombia; conforme a la discusión previa, se observa que las mayores concentraciones se presentaron en Bogotá y en la Zona Minera del Departamento del Cesar. Se observa que, al menos para las estaciones con las mayores concentraciones, los niveles disminuyeron progresivamente entre 2011 y 2014 pero se incrementaron nuevamente en 2015, especialmente para la Zona Minera del Cesar.

El Mapa 6-2, el Mapa 6-3 y el Mapa 6-4 muestran un acercamiento del mapa general para Bogotá y sus alrededores, el municipio de Itagüí en el Valle de Aburrá, Santa Marta y sus alrededores, la Zona Minera del Departamento del Cesar y la jurisdicción de CORPOGUAJIRA.

Figura 6-1. Concentraciones promedio anuales entre 2011 y 2014 de Partículas Suspensas Totales (PST) para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible de 100 µg/m³ en un tiempo de exposición anual. Los promedios son geométricos.

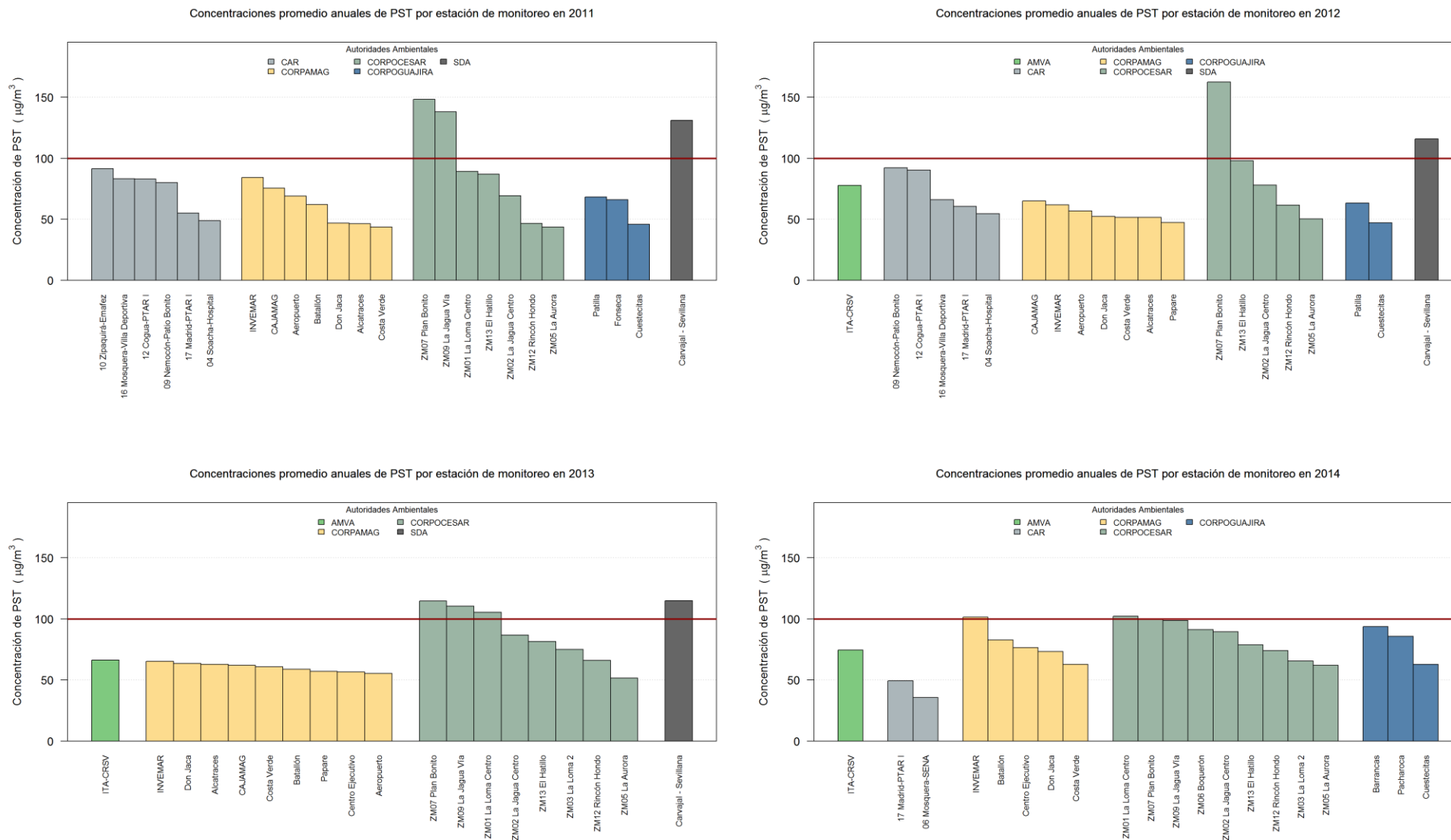


Figura 6-2. Concentraciones promedio anuales de Partículas Suspendidas Totales (PST) en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible de 100 µg/m³ en un tiempo de exposición anual. Los promedios son geométricos.

Concentraciones promedio anuales de PST por estación de monitoreo en 2015

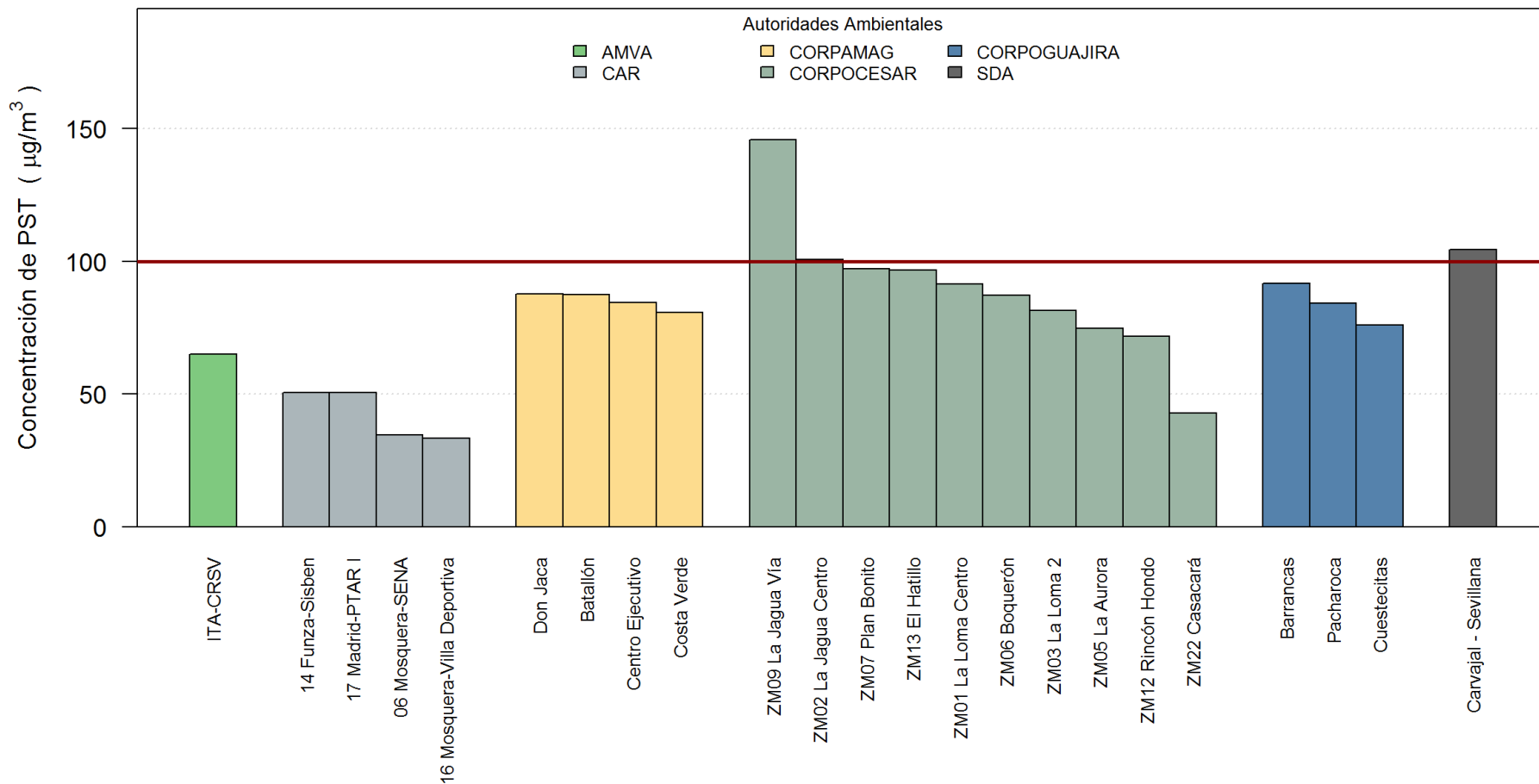


Figura 6-3. Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de AMVA, CAR y de SDA que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición anual. Los promedios son geométricos.

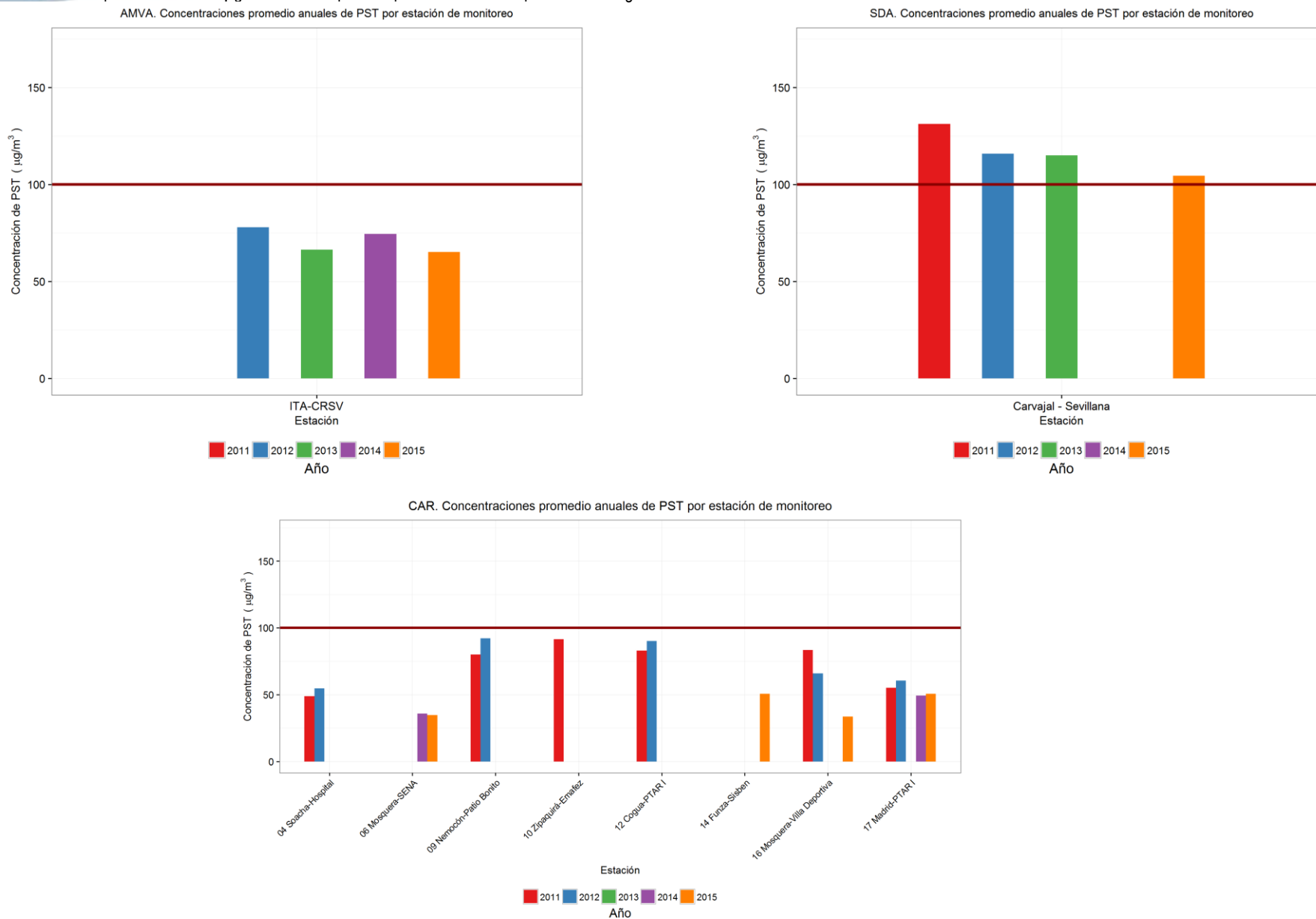


Figura 6-4. Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA que tienen una cobertura temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible de 100 µg/m³ en un tiempo de exposición anual. Los promedios son geométricos.

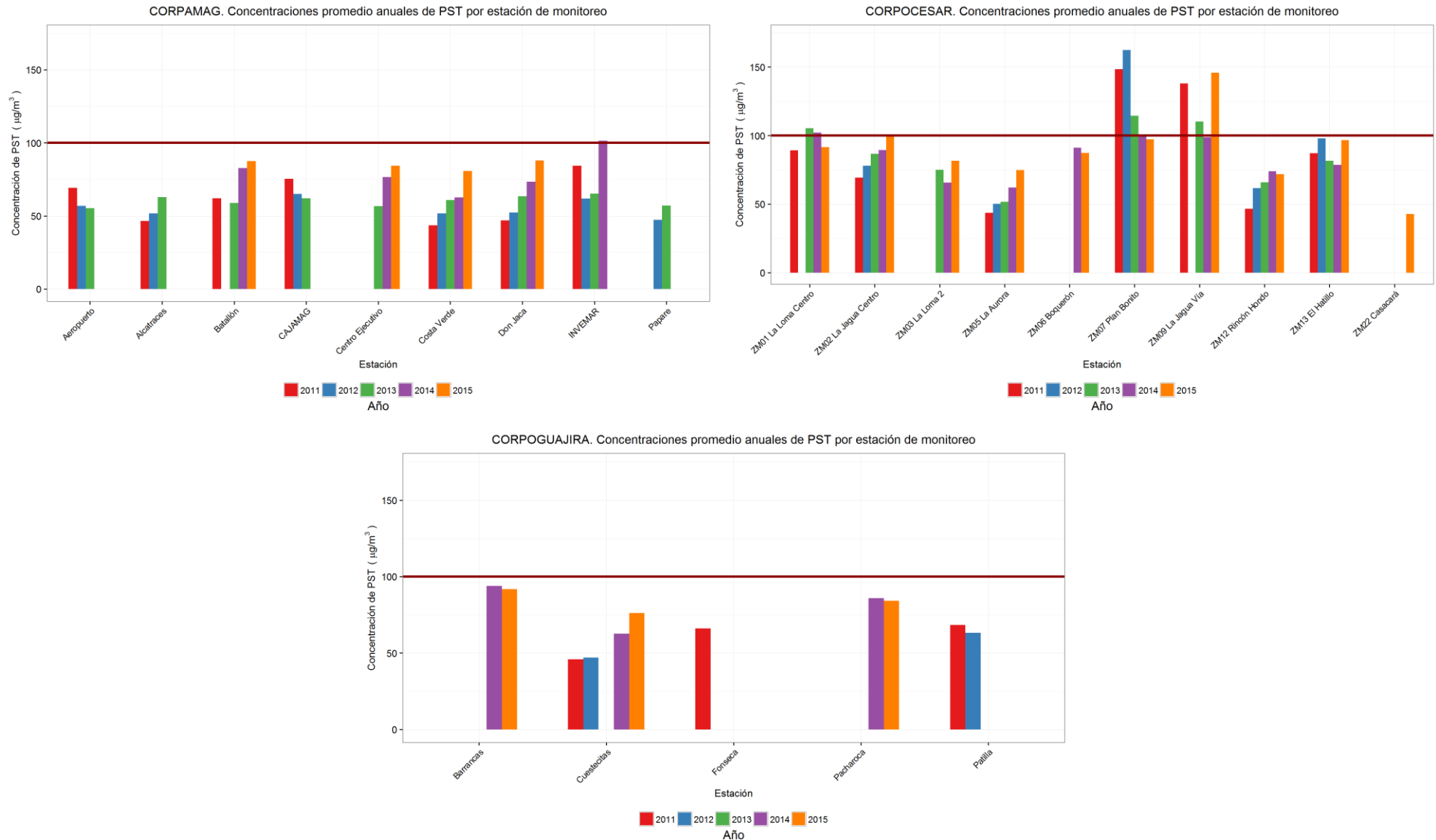
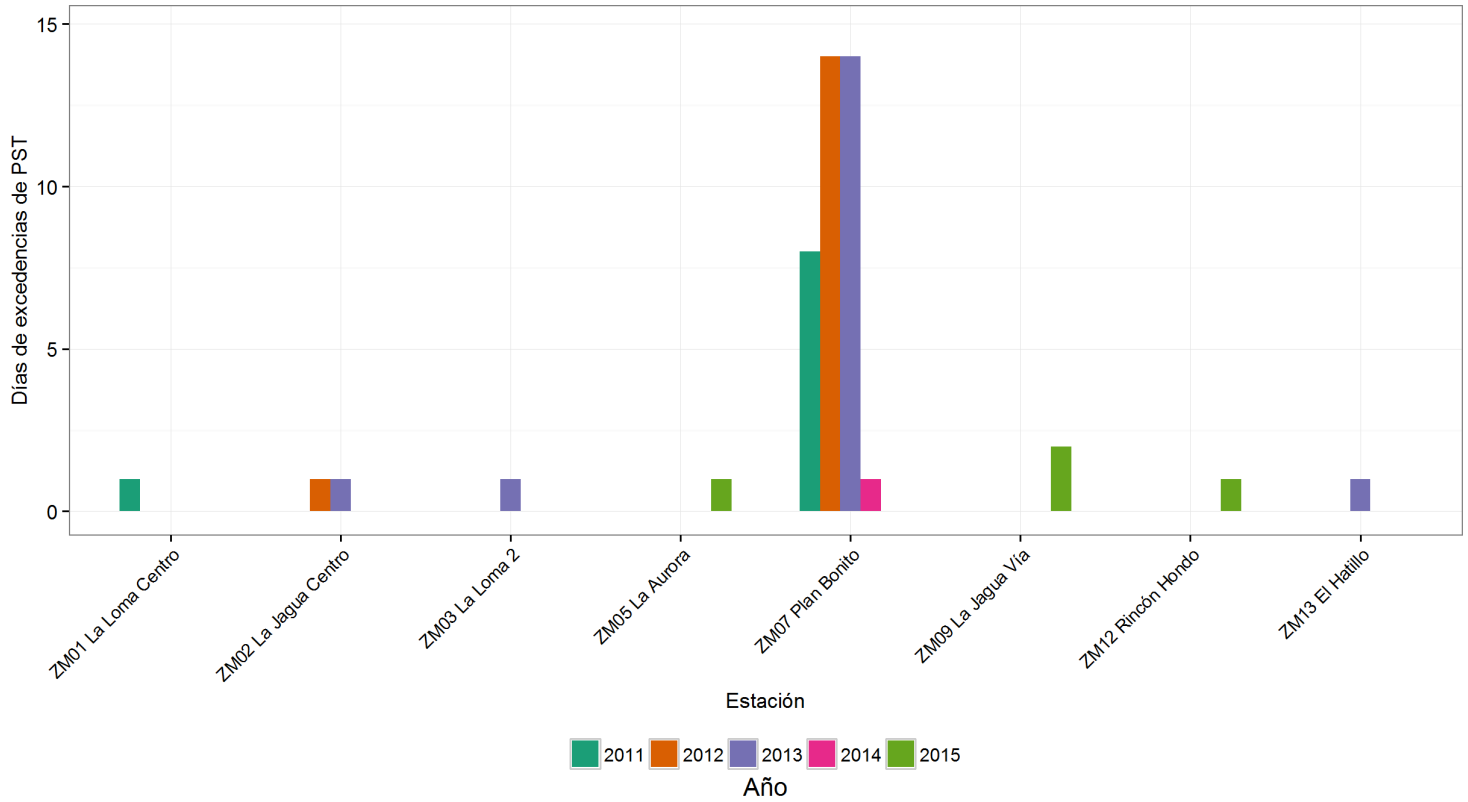


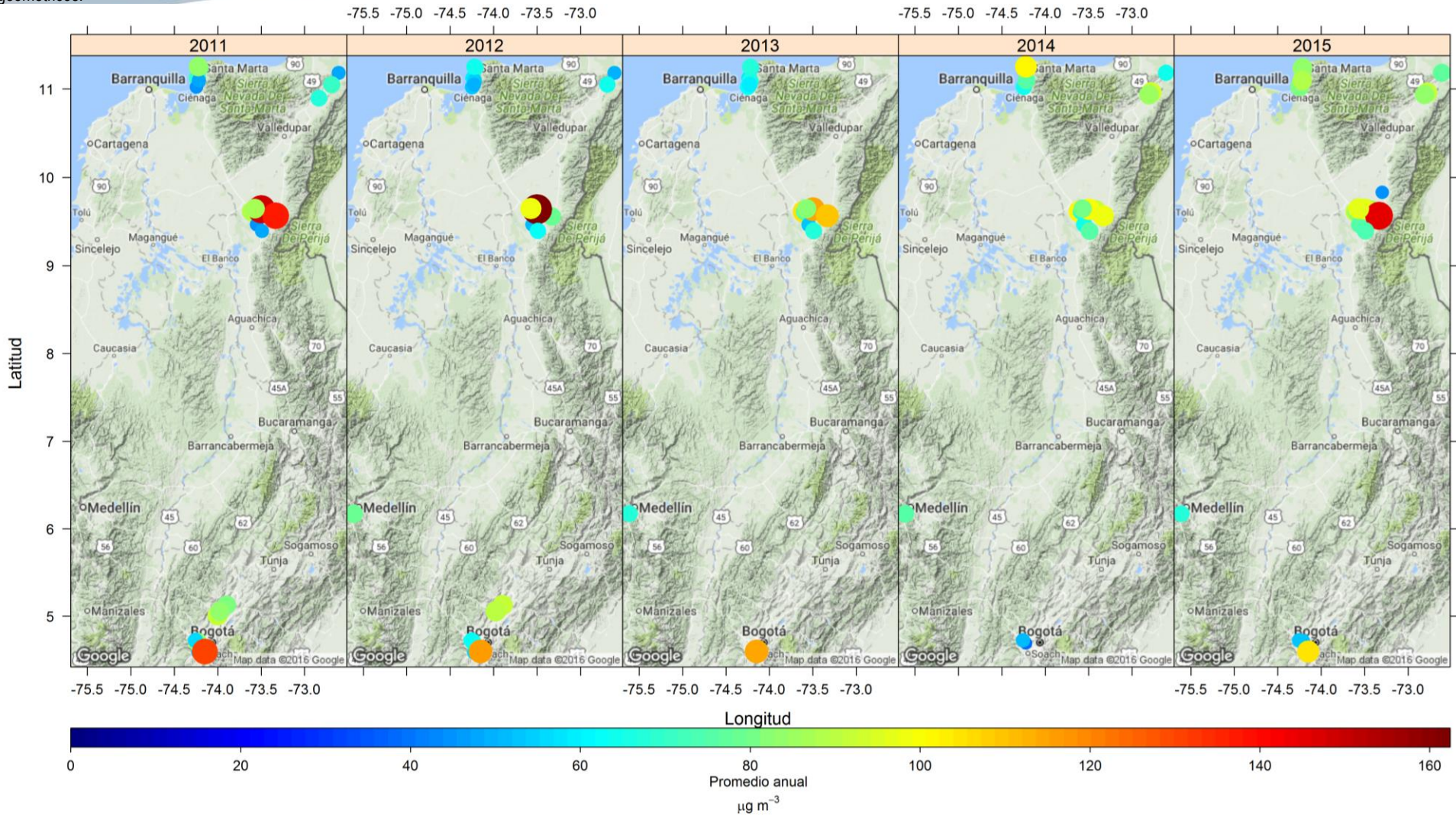
Figura 6-5. Número de días de excedencias de las concentraciones de PST al límite máximo permisible diario de 300 µg/m³ por estación para el SVCA de CORPOCESAR entre 2011 y 2015.

No se presenta información para otros SVCA porque, con excepción de un día de excedencia en la estación Carvajal de la SDA en 2011, ninguna otra estación superó este límite normativo.

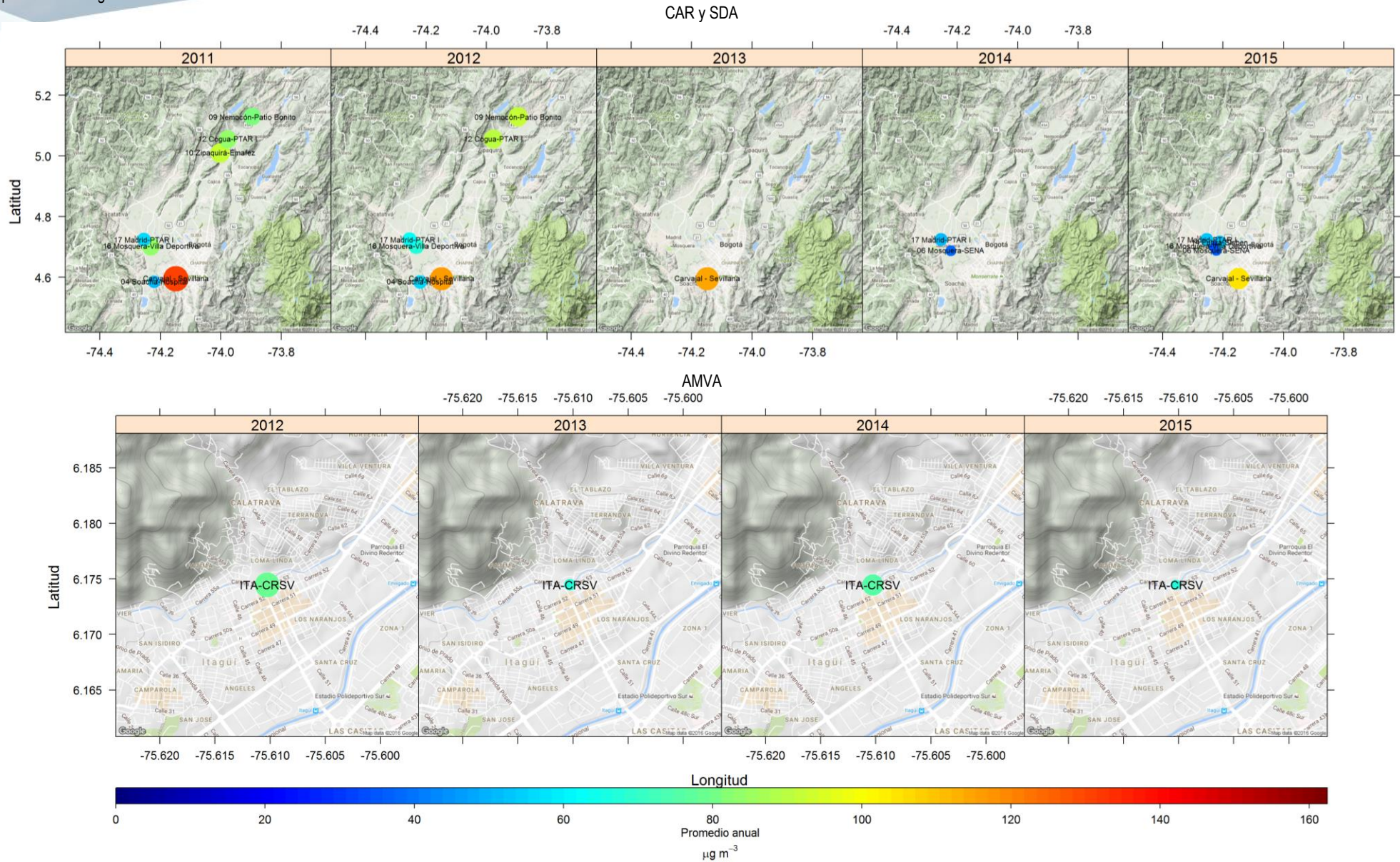
CORPOCESAR. Días de excedencias de PST por estación de monitoreo. Límite de 300 µg/m³



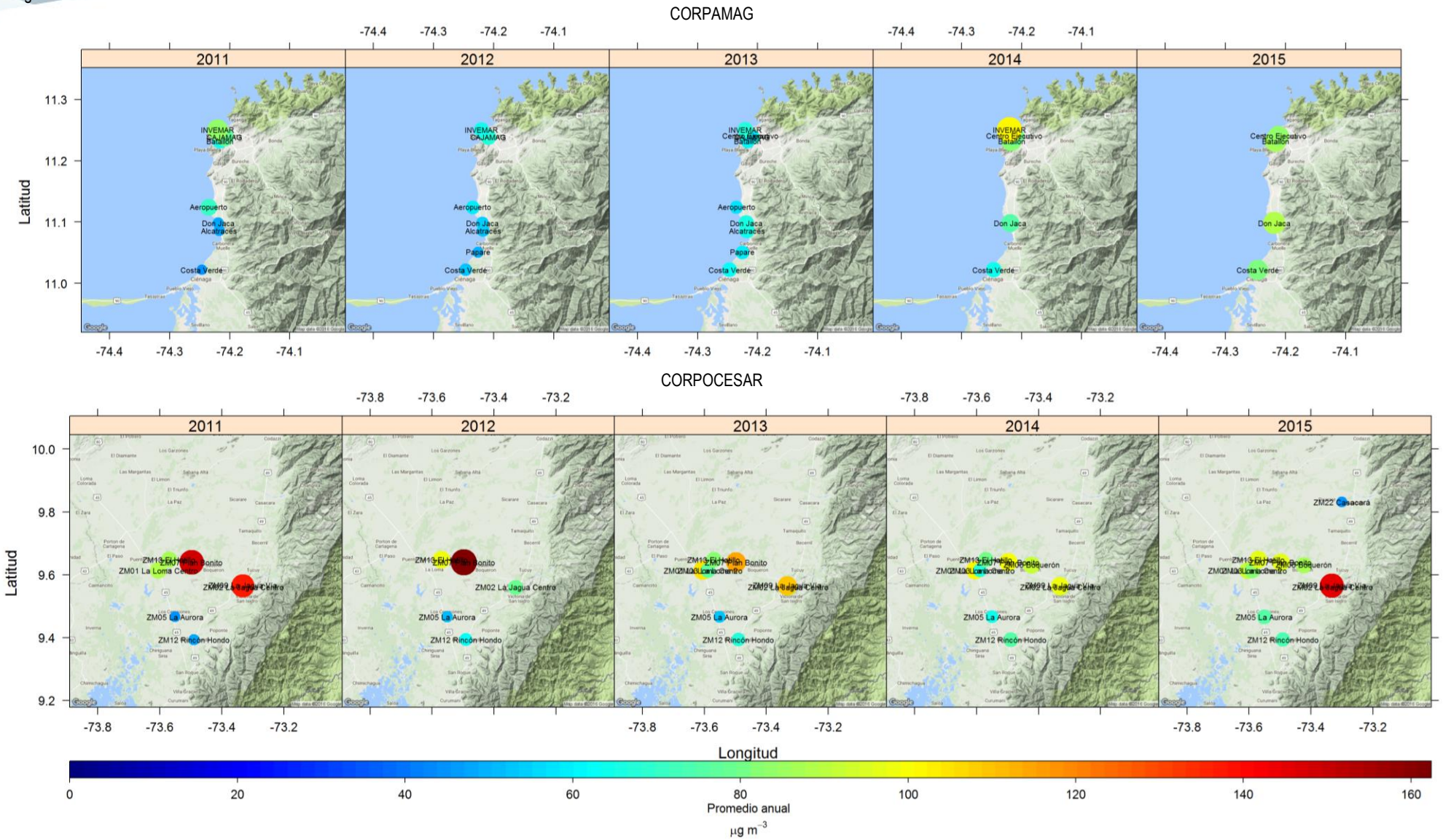
Mapa 6-1. Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PST entre 2011 y 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia con representatividad temporal igual o superior a 75%. Promedios geométricos.



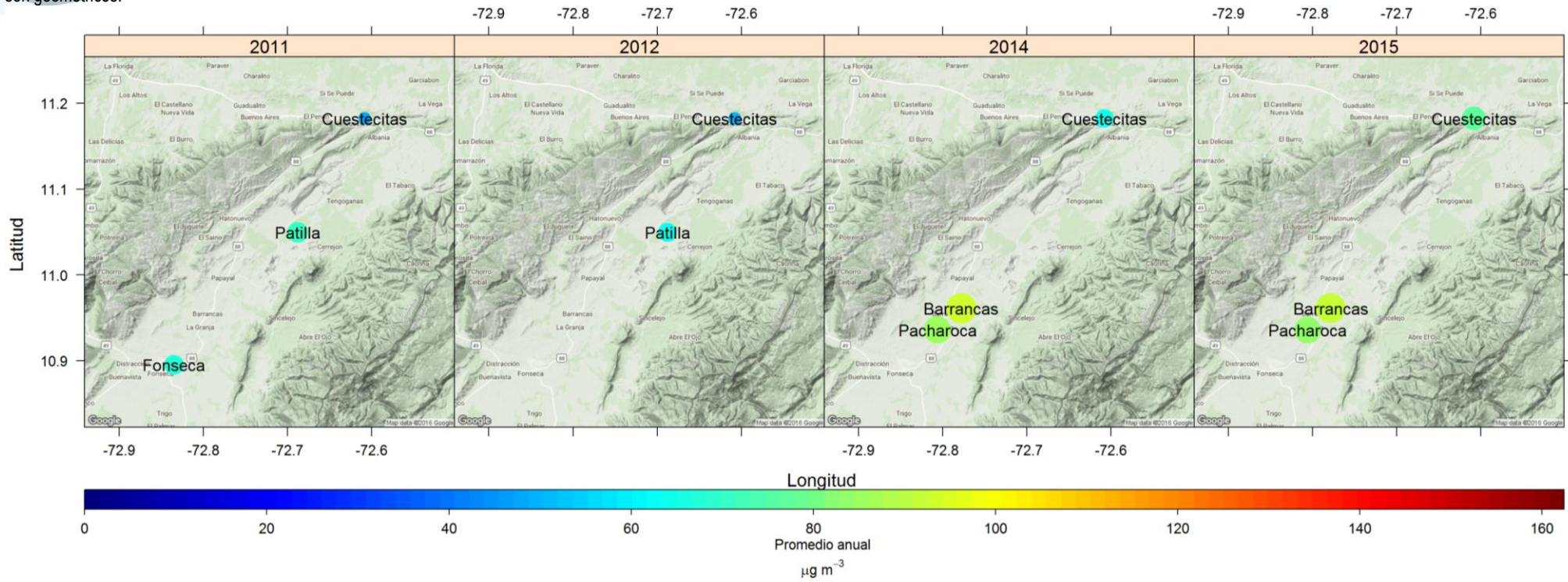
Mapa 6-2. Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CAR y SDA (entre 2011 y 2015) y AMVA (Itagüí) entre 2012 y 2015 con una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.



Mapa 6-3. Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones de los SVCA de CORPAMAG y CORPOCESAR entre 2011 y 2015 que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.



Mapa 6-4. Concentraciones promedio anuales de PST para las estaciones del SVCA de CORPOGUAJIRA (para 2011, 2012, 2014 y 2015) que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. Los promedios son geométricos.



6.2. Material particulado PM₁₀

El material particulado de tamaño menor a 10 μm , PM₁₀, fue el contaminante criterio más monitoreado por los SVCA de Colombia entre 2011 y 2015; su importancia radica en que, debido a su tamaño, tiene el potencial de afectar negativamente la salud de la población pudiendo penetrar por las vías respiratorias. De acuerdo con la Resolución 610 de 2010, existen dos límites máximos permisibles para este contaminante los cuales son 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición anual y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición diario.

6.2.1. Concentraciones promedio anuales

La Figura 6-6 y la Figura 6-7 presentan las concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 y su comparación con respecto al límite máximo permisible de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Algunas estaciones de los SVCA pertenecientes a áreas urbanas presentaron incumplimientos de este límite, las cuales corresponden al Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA) y a las ciudades de Bogotá (SDA), Bucaramanga (CDMB) y Santa Marta (CORPAMAG). Estas zonas se caracterizan por su alta densidad poblacional y por la diversidad de actividades de emisión de fuentes fijas, móviles y de área; la confluencia de estas características en áreas reducidas hace crítico el análisis de la calidad del aire, teniendo en cuenta el potencial de afectación de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos a la salud de la población. Como casos particulares, se destacan las estaciones Carvajal y Kennedy, localizadas en el suroccidente de Bogotá, las cuales durante los cinco años estudiados incumplieron la normatividad nacional y cuyas concentraciones promedio anuales se encuentran entre las más altas con respecto a las estaciones que monitorearon PM₁₀ en el país.

En la jurisdicción de la CAR también se presentaron incumplimientos del límite máximo permisible cuyo número aumentó especialmente en los años 2014 y 2015. Para el análisis de este comportamiento es importante tener en cuenta que el propósito principal de las estaciones de esta autoridad ambiental es la medición en zonas de influencia asociadas a la actividad industrial.

De forma similar a las estaciones Carvajal y Kennedy en Bogotá, en la Zona Minera del Departamento de César (CORPOCESAR) se presentó incumplimiento de la normatividad en dos estaciones particulares (Plan Bonito y La Jagua Vía) durante los cinco años estudiados. Para el Departamento de la Guajira, se presentó excedencia en la estación Cañaverales en 2014 y en Las Casitas en 2015.

Para el año 2013 se contó con una serie representativa en la estación CORNARE perteneciente a la autoridad ambiental del mismo nombre; es decir, cumplió con el criterio de mínimo 75% de datos válidos con respecto al total posible en el año. Sin embargo, es importante mencionar que el SVCA de esta Corporación es de Tipo I – Indicativo teniendo en cuenta que los municipios de su jurisdicción tienen una población menor a 150.000 habitantes; por tanto, las actividades desarrolladas en esta jurisdicción corresponden principalmente a campañas de monitoreo durante tres meses cada año, implicando que no es pertinente evaluar las respectivas series de datos con el criterio de representatividad temporal anual.

6.2.2. Tendencias entre 2011 y 2015

Las tendencias de las concentraciones anuales para las estaciones de las Autoridades Ambientales Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA) y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), cuyas jurisdicciones abarcan las áreas urbanas del Valle de Aburrá, Bucaramanga, Cali y Bogotá, respectivamente, se presentan en la Figura 6-8.

Para AMVA se observaron incumplimientos en las estaciones Plaza de Mercado Caldas (CAL – PMER) en 2012 y 2013, en el Colegio El Rosario de Itagüí (ITA – CRSV) en 2013, en Éxito San Antonio en Medellín

(MED – EXSA) en 2011, 2013 y 2015, en Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. en 2013 y en Universidad Nacional de Colombia M2 en 2014 y 2015. Aunque no pertenecen a AMVA, las estaciones Envigado – Fundadores y Medellín – Altavista de CORANTIOQUIA se encuentran dentro del Valle de Aburrá; la primera superó el límite máximo permisible en 2011 mientras que en la segunda ocurrió para los años 2012 y 2015.

En la ciudad de Bucaramanga, la estación Ciudadela presentó un incremento abrupto en su concentración anual de 2014 en comparación con años previos incumpliendo el límite máximo permisible, y la única serie anual de la Estación Centro en 2011 presentó excedencia; con respecto a la ciudad de Cali, todas las estaciones se mantuvieron por debajo del límite normativo, aunque La Flora se encontró muy cerca de superarlo en 2014. Los promedios anuales de La Ermita y de Pance aumentaron en 2015 con respecto a 2014.

En el caso de la ciudad de Bogotá, las estaciones Carvajal – Sevillana y Kennedy presentaron las concentraciones más altas entre las estaciones analizadas, las cuales se incrementaron progresivamente entre 2012 y 2014, luego de un descenso notable entre 2011 y 2012. Fontibón, Suba, Puente Aranda y Tunal también superaron el límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se observa que para el año 2014, las concentraciones de las dos últimas estaciones presentaron un incremento notable en comparación con el año 2013. Aunque no pertenece a la jurisdicción de la SDA, la estación Bogotá – Mochuelo de la CAR, ubicada en el sur de la ciudad, incumplió el límite máximo permisible en 2011, 2013 y 2014. Con excepción de Las Ferias, todas las estaciones de Bogotá disminuyeron sus concentraciones en 2015 con respecto al año 2014.

La Figura 6-9 muestra la evolución de las concentraciones de PM_{10} para las estaciones de los SVCA ubicados en la Región Caribe de Colombia, que corresponden a CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA. En las estaciones de la jurisdicción de CORPAMAG que cuentan con información disponible, las concentraciones de los años 2014 y 2015 son en general mayores que las correspondientes a los años 2011 y 2012, lo cual indica un deterioro gradual de la calidad del aire con respecto a este contaminante y merece especial atención al acercarse al incumplimiento del límite máximo permisible; se destaca especialmente la estación Molinos Santa Marta cuyas concentraciones promedio anuales se incrementaron de forma abrupta en 2014 y 2015 e incumplieron la normatividad nacional.

Para la Zona Minera del Departamento del Cesar, las estaciones Plan Bonito y La Jagua Vía superaron el límite máximo permisible en los cinco años estudiados donde las concentraciones promedio anuales de 2015 son mayores que las correspondientes al año 2014. En La Loma Centro, La Aurora, Chiriguaná y Becerril las concentraciones de PM_{10} han estado en aumento progresivo entre 2011 y 2015 y el mismo caso sucede para Bomberos, ubicada en la ciudad de Valledupar. Por el contrario, en La Loma 2 se han reducido las concentraciones entre 2013 y 2015 así como en El Hatillo entre 2012 y 2014.

En cuanto a las estaciones del Departamento de La Guajira, se observa que ninguna estación presentó representatividad temporal superior a 75% para el año 2013, lo cual se debió a asuntos relacionados con dificultades en cuanto a la contratación para la operación de este SVCA. A pesar de esta ausencia de información, se observa que las estaciones Albania, Cuestecitas, Hatonuevo, Las Casitas, Los Remedios, Papayal, y Provincial han presentado aumentos graduales en sus concentraciones. Los únicos incumplimientos del límite máximo permisible anual fueron observados para las estaciones Cañaverales en 2014 y Las Casitas en 2015.

La Figura 6-10 presenta las tendencias interanuales para las estaciones de los SVCA de CAR, CORANTIOQUIA y CORPOCALDAS. Para la jurisdicción de la CAR, se observan aumentos progresivos de concentración en Soacha – Hospital, La Calera – Alcaldía, Nemocón – Patio Bonito, Cogua – PTAR I y Bogotá – Mochuelo (entre 2012 y 2014); se observa, por el contrario, un descenso progresivo en Mosquera – Villa Deportiva. Para las estaciones del SVCA de CORANTIOQUIA que cumplen con el criterio de

representatividad temporal, la información disponible no es suficiente para evidenciar una tendencia durante los años estudiados; sin embargo, se observan incumplimientos normativos para Envigado – Fundadores en 2011 y Medellín – Altavista en 2012 y 2015. En la ciudad de Manizales (CORPOCALDAS) la estación Licorera presenta datos para 2011, 2012 y 2014 pero no una tendencia definida.

La Figura 6-11 presenta tendencias de las concentraciones anuales de PM_{10} entre 2011 y 2015 para la estación Unimar de CORPONARIÑO ubicada en la ciudad de Pasto (Universidad Mariana) y COMFENALCO de CRQ en Armenia. En la primera se observa disminución gradual de las concentraciones promedio anuales entre 2012 y 2014, con un leve aumento en 2015 mientras que en la segunda las concentraciones han aumentado sutilmente entre 2012 y 2015. En todo caso, no se supera el límite máximo permisible al estar los niveles de concentración notablemente más bajos que este valor normativo.

6.2.3. Comparación con las tendencias en el periodo 2007 – 2010

En esta sección se presenta la comparación de las concentraciones anuales de PM_{10} en 2011 – 2015 con respecto al periodo 2007 – 2010.

- **AMVA:** se observa que en general los niveles de concentración disminuyeron, especialmente para Copacabana (COP – HSMA), CORANTIOQUIA (MED – CORA), Politécnico (MED – PJIC), Universidad Nacional (MED – UNFM) y PTAR (ITA – PTAR). Sin embargo, aún se mantienen relativamente altos para Caldas (CAL – PMER).
- **CAR:** en el periodo 2011 – 2015 las concentraciones aumentaron para Cajicá (Cajicá – Manas), Nemocón (Nemocón – Patio Bonito), Ráquira (Ráquira – Colegio), Sibaté (Sibaté – Los Sauces), Sopó (Sopó – Briceño), y disminuyeron para Madrid (Madrid – PTAR I), Mosquera – SENA, Mosquera – Villa Deportiva y Zipaquirá (Zipaquirá – Emafez).
- **CDMB:** las concentraciones de PM_{10} aumentaron en las estaciones Centro, Ciudadela y Florida. En la estación Norte los niveles continúan disminuyendo.
- **CORANTIOQUIA:** los niveles de concentración de la estación Envigado – Fundadores disminuyeron levemente y en Medellín Altavista no se observaron variaciones significativas.
- **CORPAMAG:** no se observan cambios significativos entre los niveles de 2011 y los correspondientes a 2007 – 2010. Sin embargo, entre 2011 y 2015 las concentraciones de Club Santa Marta, Costa Verde y Don Jaca están en aumento progresivo, caso contrario a Zuana donde la tendencia de disminución se ha mantenido entre 2008 y 2014.
- **CORPOBOYACÁ:** el promedio anual registrado para el año 2015 en la estación El Recreo en la ciudad de Sogamoso se redujo considerablemente en comparación con el valor observado para el año 2010.
- **CORPOCALDAS:** solamente es posible realizar la comparación para la estación Licorera. Se observa que los niveles de 2011, 2012 y 2014 son muy similares al registrado en 2010.
- **CORPOCESAR:** los niveles de concentración se redujeron notablemente en las estaciones con las mayores concentraciones que son La Loma 2, Plan Bonito, La Jagua Vía y Chiriguaná. Sin embargo, se observan aumentos para Loma Centro, La Jagua Centro, La Aurora, El Hatillo y Beceril.
- **CORPOGUAJIRA:** las concentraciones de Barrancas disminuyeron, pero están aumentando progresivamente en Las Casitas, Los Remedios, Papayal y Provincial, en comparación con los niveles del año 2010.
- **CORTOLIMA:** en la estación CORTOLIMA no se observan diferencias significativas entre el promedio anual de 2010 y el correspondiente a 2015. En ambos casos no se observaron incumplimientos normativos.

- **SDA:** no se observan cambios significativos salvo disminuciones leves en las estaciones Kennedy, Fontibón y Suba.

6.2.4. Excedencias del límite máximo permisible diario

La Figura 6-12 y la Figura 6-13 presentan el número de días de excedencias de PM_{10} del límite máximo permisible diario de $100 \mu g/m^3$ para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal suficiente entre 2011 y 2015. En concordancia con la evaluación del cumplimiento del límite máximo permisible anual, en los cinco años analizados se presentaron incumplimientos del umbral diario en las estaciones de los municipios del Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA), en la jurisdicción de la CAR, en las ciudades de Bucaramanga (CDBM) y Bogotá (SDA), en el Departamento del Valle del Cauca (CVC) y en la Región Caribe de Colombia (CORPAMAG, CORPOCESAR, CORPOGUAJIRA).

Es importante considerar que el nivel de incumplimiento varía considerablemente entre las estaciones analizadas ya que este cubre un rango comprendido entre 1 y 118 días. En este aspecto se destacan las estaciones Carvajal – Sevillana y Kennedy de Bogotá, que se localizan en su zona suroccidental, donde el número de días de excedencias en todos los años estudiados fue notablemente alto en comparación con las demás estaciones del país, especialmente para 2014. En Carvajal – Sevillana este número aumentó progresivamente entre 2012 y 2014 pasando de 48 a 118 días, luego de una disminución abrupta desde los niveles de 2011, y presentó un descenso relativamente bajo en 2015 llegando a 103 días. Para la estación Kennedy el número de días de excedencias disminuyó notablemente en 2015, con respecto al 2014, pasando de 49 a 29 días, aunque sigue siendo alto en comparación con las demás estaciones del SVCA.

En el caso de las estaciones de la jurisdicción de la CAR, el mayor número de días de excedencias correspondió a la estación Sibaté – Los Sauces entre los años 2013 y 2015, llegando a un máximo de 34 días en 2013. En estos mismos años también se observaron excedencias en Sopó – Briceño con un máximo de 15 días en 2014.

En la ciudad de Santa Marta, se observó un máximo de 29 días de excedencias en la estación Molinos Santa Marta en el año 2014, seguido por 9 días en el año 2015. Club Santa Marta y Don Jaca también excedieron el límite diario, pero con 3 y 1 días, respectivamente, en 2015.

En la Zona Minera del Cesar, el mayor número de días de excedencias se encuentran en Plan Bonito y La Jagua Vía, llegando a un máximo de 29 días en la primera estación en el año 2012; para estos dos sitios de monitoreo no se observa una tendencia definida de aumento o de disminución del número de incumplimientos diarios.

Finalmente, para CORANTIOQUIA, se destaca el comportamiento de la estación Medellín – Altavista en el año 2012 con 37 días de excedencias, los cuales contrastan con el valor de 2015 de 7 días. En este punto es importante destacar que el número de días de excedencias no necesariamente es proporcional al promedio anual ya que, como se observa en la Figura 6-10, los promedios para estos dos años son similares.

6.2.5. Mapas de las concentraciones anuales

El Mapa 6-5 presenta la ubicación de las estaciones de los SVCA de Colombia que monitorearon PM_{10} con sus respectivos promedios anuales; tanto la escala de colores como el tamaño de cada uno de los círculos son indicadores de la magnitud de la concentración. Nuevamente se observa que las concentraciones más altas corresponden a las estaciones ubicadas en las áreas urbanas (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Bogotá, Bucaramanga, Cali, y Santa Marta), la jurisdicción de la CAR y la Zona Minera del Departamento del Cesar.

Con el objetivo de presentar un mayor nivel de detalle, el Mapa 6-6, el Mapa 6-7, el Mapa 6-8 y el Mapa 6-9 muestran los comportamientos particulares para los SVCA de Antioquia (AMVA, CORNARE y CORANTIOQUIA), la ciudad de Bucaramanga (CDMB), el Valle del Cauca (CVC y DAGMA), la ciudad de Bogotá (SDA), la jurisdicción de la CAR, la ciudad de Santa Marta (CORPAMGAG), la Zona Minera del Departamento del Cesar (COPORCESAR) y el Departamento de la Guajira (CORPOGUAJIRA).

6.2.6. Índice de Calidad del Aire.

El Índice de Calidad del Aire para PM_{10} fue calculado a partir de los promedios móviles de 24 horas para los equipos automáticos y con promedios diarios simples para los equipos manuales. La Figura 6-14, la Figura 6-15, la Figura 6-16, la Figura 6-17 y la Figura 6-18 presentan las proporciones del Índice de Calidad del aire de acuerdo con la Tabla 6-1 para las estaciones de los SVCA de AMVA, CAR, CORPAMAG, CORPOCESAR y SDA entre los años 2011 y 2015.

Para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), las concentraciones de PM_{10} se enmarcaron en las categorías “Buena” y “Moderada” en los años estudiados. En la mayoría de estaciones predominó la primera, con excepción de Plaza de Mercado Caldas (CAL – PMER) en 2012 y 2013, Éxito San Antonio (MED – EXSA) en 2011, 2013 Y 2015, Colegio El Rosario de Itagüí (ITA - CRSV) en 2013, y Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM) en 2014. La categoría “Moderada” implica posibles síntomas respiratorios en personas inusualmente sensibles, posible agravamiento de enfermedades en el corazón o los pulmones en personas con enfermedades cardiopulmonares y en adultos mayores.

En la jurisdicción de la CAR las concentraciones de los años 2011 y 2012 se enmarcaron en las categorías “Buena” y “Moderada”, con predominancia de la primera. En el año 2013 se observó la aparición de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles”, la cual representa incremento de la probabilidad de síntomas respiratorios en personas sensibles, agravación de enfermedades relacionadas con el corazón o los pulmones y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y en adultos mayores. Además, entre 2013 y 2015 la predominancia de la categoría “Moderada” aumentó con especial relevancia en Nemocón – Patio Bonito en 2014 y 2015, y Ráquira Colegio en 2015, donde ningún día presentó una calidad del aire “Buena”.

En la ciudad de Santa Marta (CORPAMAG), la categoría “Buena” predominó en los años 2011 y 2012. Sin embargo, con el transcurrir de los años se observa un deterioro de la calidad del aire en algunas estaciones, lo cual se refleja en el incremento de la participación de la categoría “Moderada” y la aparición a partir del año 2013 de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles”. Esta situación es especialmente notable en Molinos Santa Marta.

En la Zona Minera del Departamento del Cesar, la situación es especialmente sensible para dos estaciones que son La Jagua Vía y Plan Bonito donde la participación de la categoría “Moderada” es notablemente mayor. La participación de la categoría “Dañina a la Salud para Grupos Sensibles” fue observada en los años 2012 y 2013 en Plan Bonito, en 2013 en La Loma Centro, La Loma 2, y el Hatillo, en 2014 en Costa Hermosa y en 2015 en La Autora lo cual indica que las zonas de influencia de estas estaciones están afectadas por problemas de calidad del aire asociados a la actividad de la zona, presumiblemente de la actividad minera.

En la ciudad de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, SDA), hubo una participación significativa de horas con una calidad del aire “Moderada” y en todos los años se presentaron momentos con concentraciones en la categoría “Dañina a la Salud para Grupos Sensibles”. Esta situación se destaca especialmente para las estaciones Carvajal – Sevillana y Kennedy, donde la proporción de la categoría “Buena” alcanzó máximo 34% (Kennedy, 2015) en los cinco años estudiados.

Aparte de la robustez en cuanto a la oferta de datos y número de estaciones, se realizó especial énfasis en AMVA y SDA por corresponder a las áreas urbanas más grandes del país y en CAR, CORPAMAG y CORPOCESAR por representar situaciones particulares en contaminación atmosférica. Para las estaciones de los demás SVCA también fue calculado el Índice de Calidad del Aire en cada una de sus estaciones para los cinco años estudiados y los resultados indican una participación predominante de las categorías “Buena” y

“Moderada”, fundamentalmente la primera, y ciertos episodios donde se presentó una calidad del aire “Dañina a la Salud para Grupos Sensibles”.

Una excepción fue una concentración diaria de $508 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2012 en la estación Buenaventura de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, la cual corresponde a la categoría “Muy Peligrosa” pero fue confirmada como válida por la Autoridad Ambiental a partir de una consulta realizada por el IDEAM.

Figura 6-6. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible de 50 µg/m³ en un tiempo de exposición anual de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

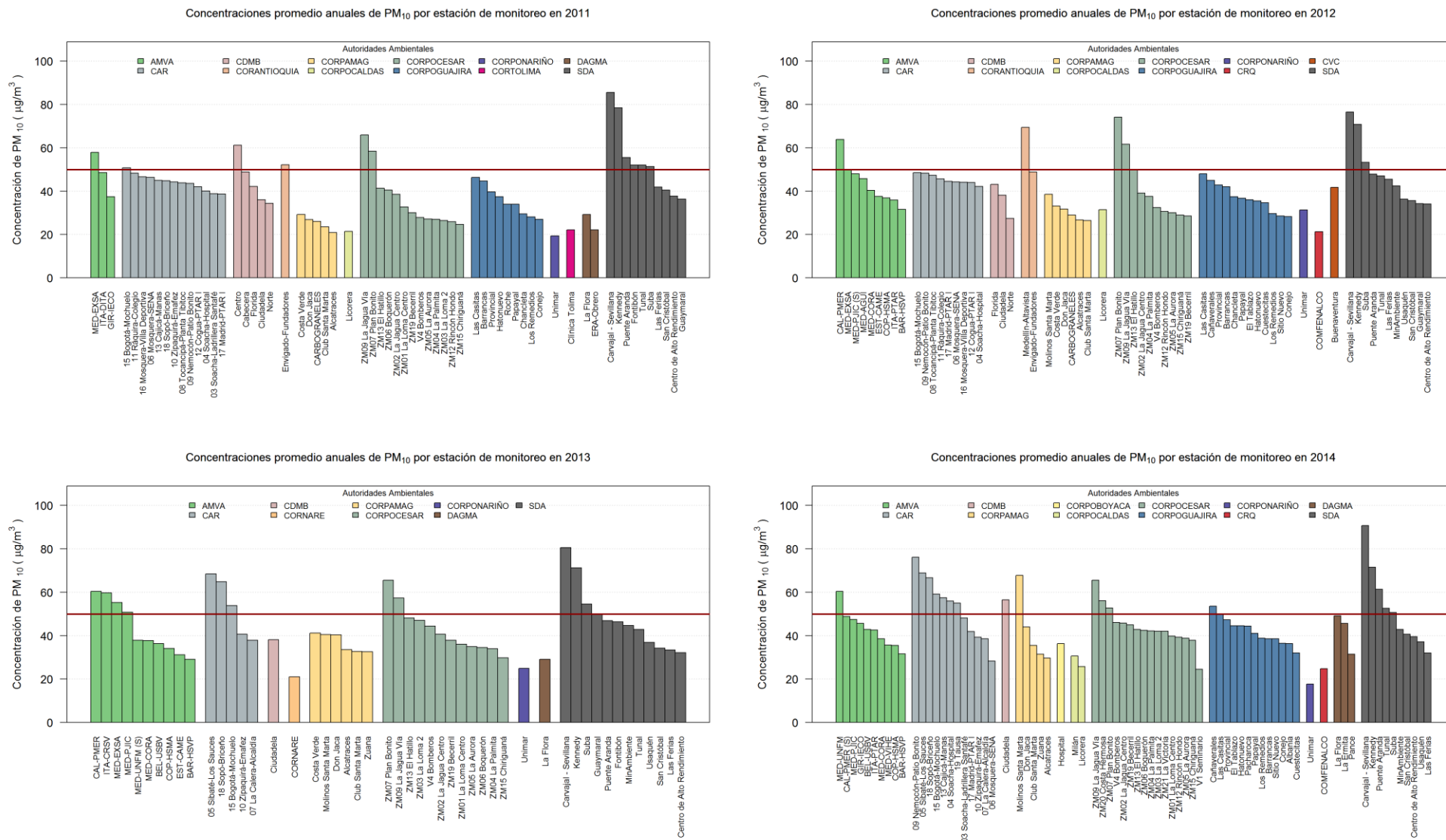


Figura 6-7. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible de 50 µg/m³ en un tiempo de exposición anual de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015

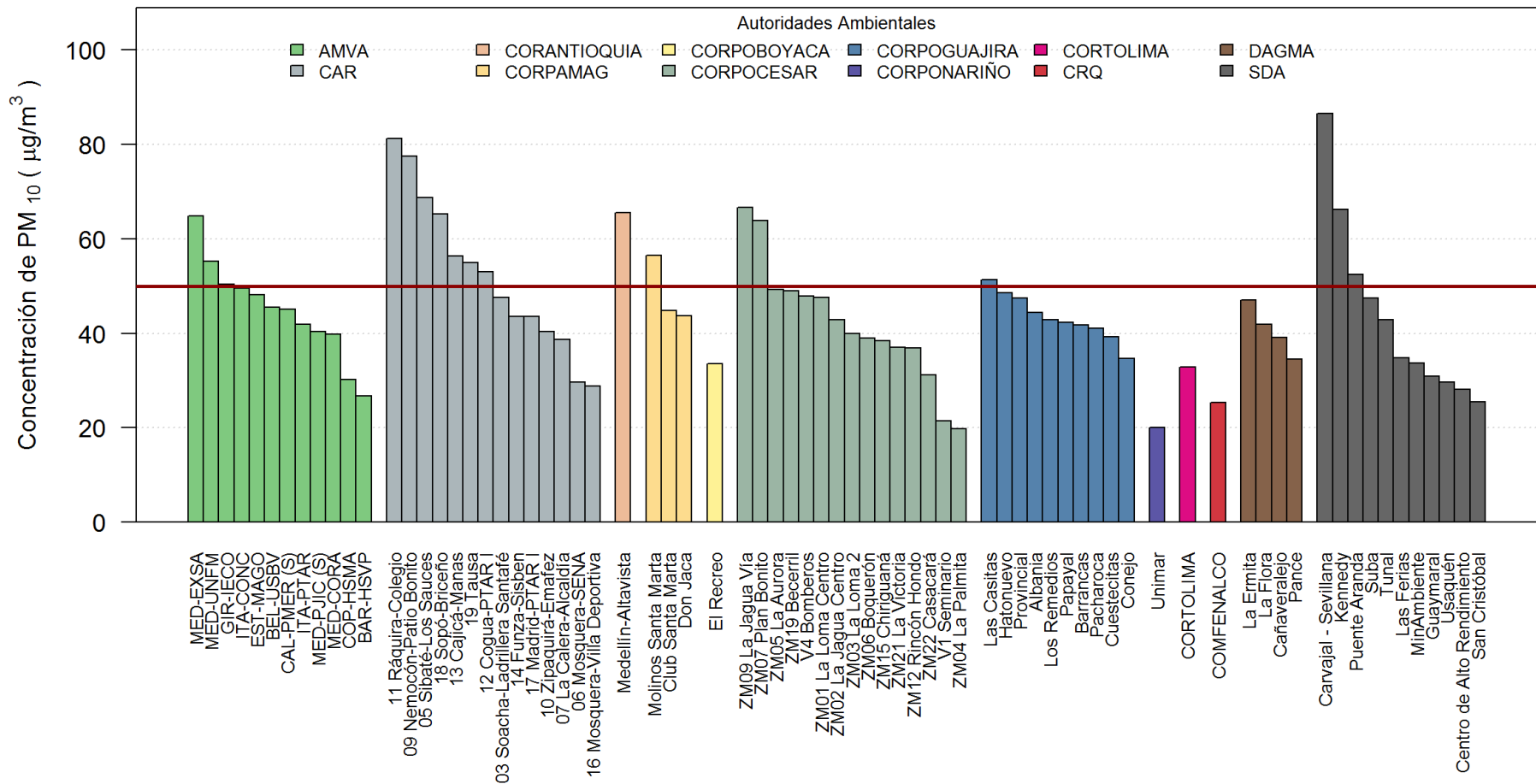


Figura 6-8. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA AMVA, CDMB, DAGMA y SDA con una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 50 µg/m³ de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

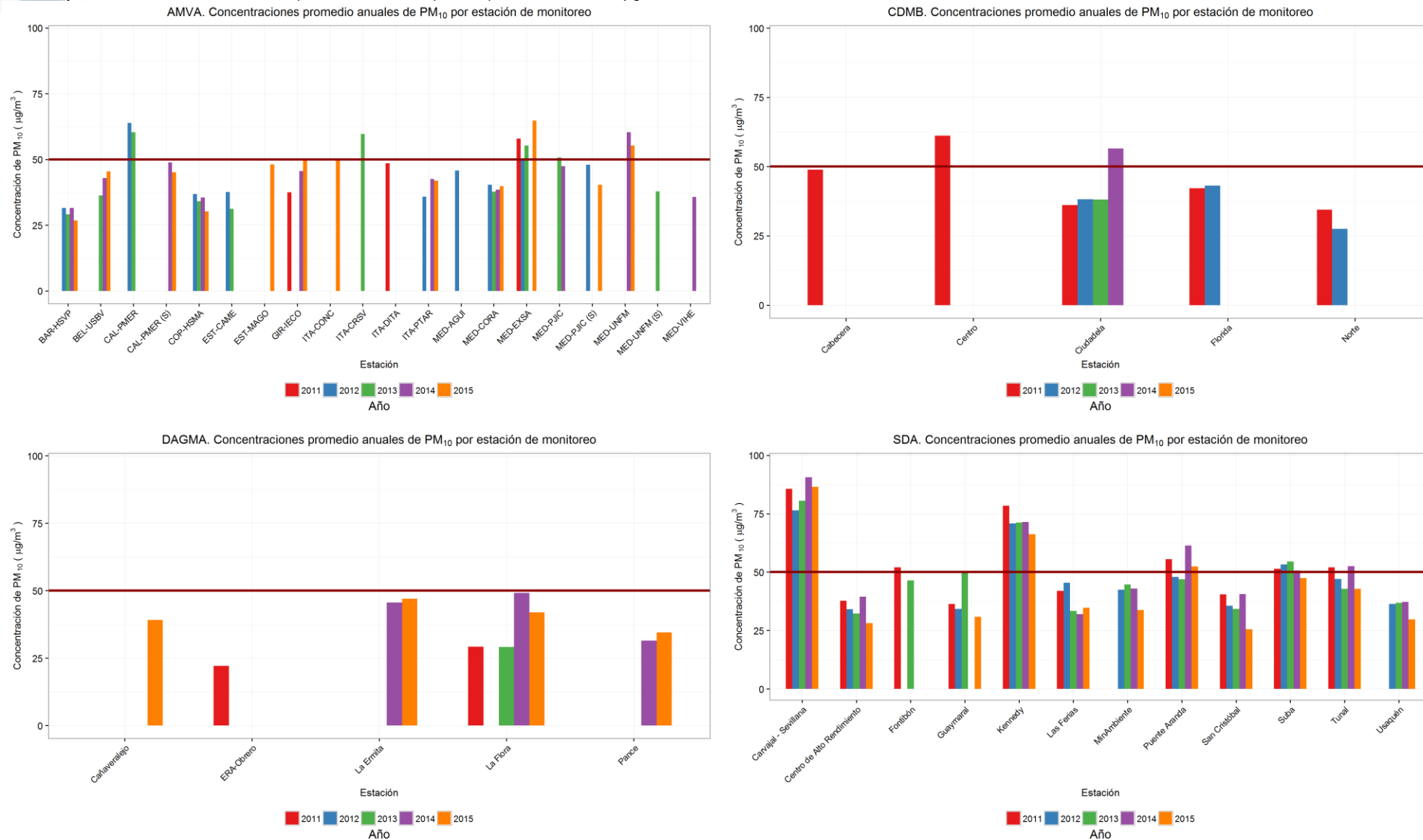


Figura 6-9. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA con una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 50 µg/m³ de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

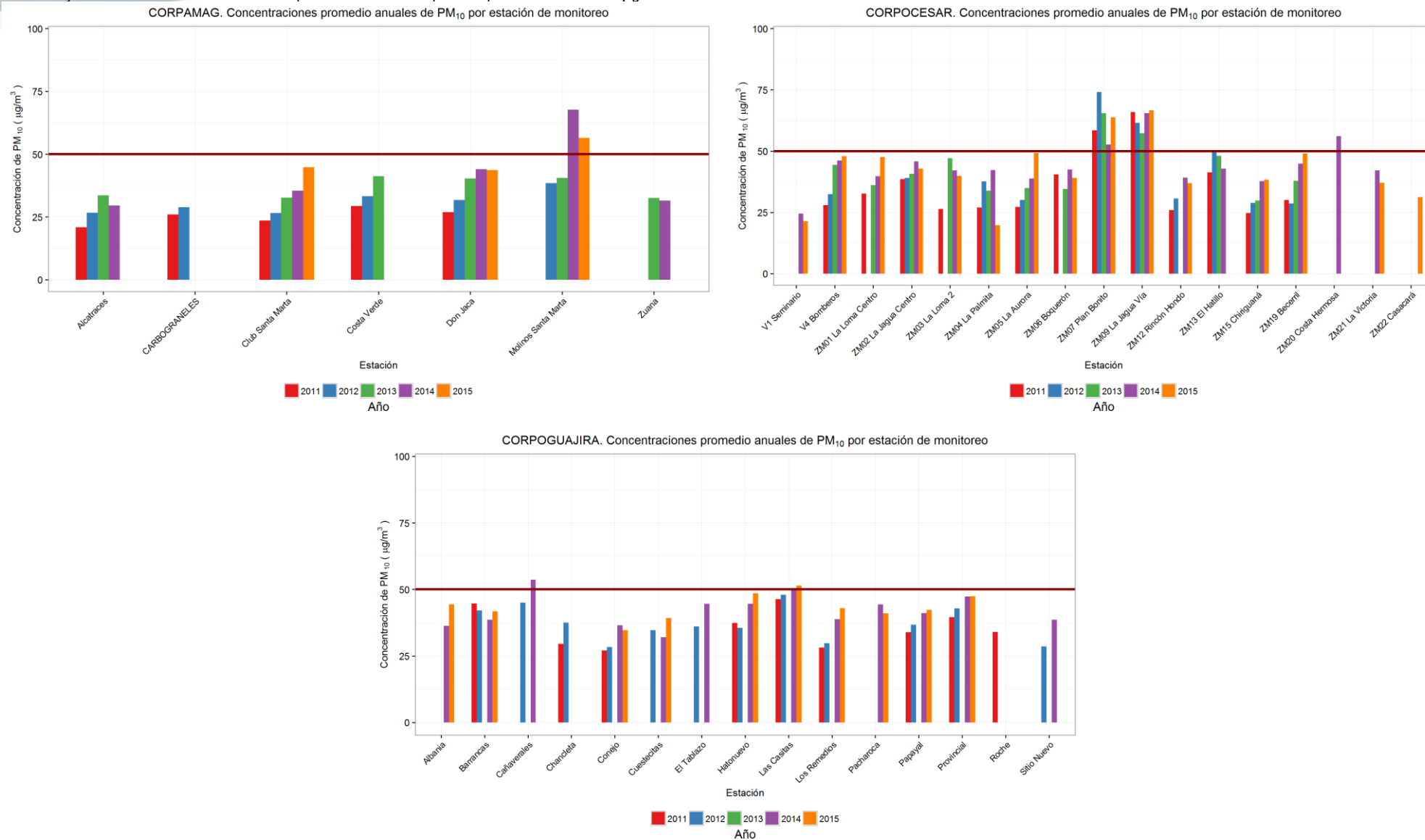


Figura 6-10. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CAR, CORANTIOQUIA y CORPOCALDAS con una cobertura temporal de mínimo 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 50 µg/m³ de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

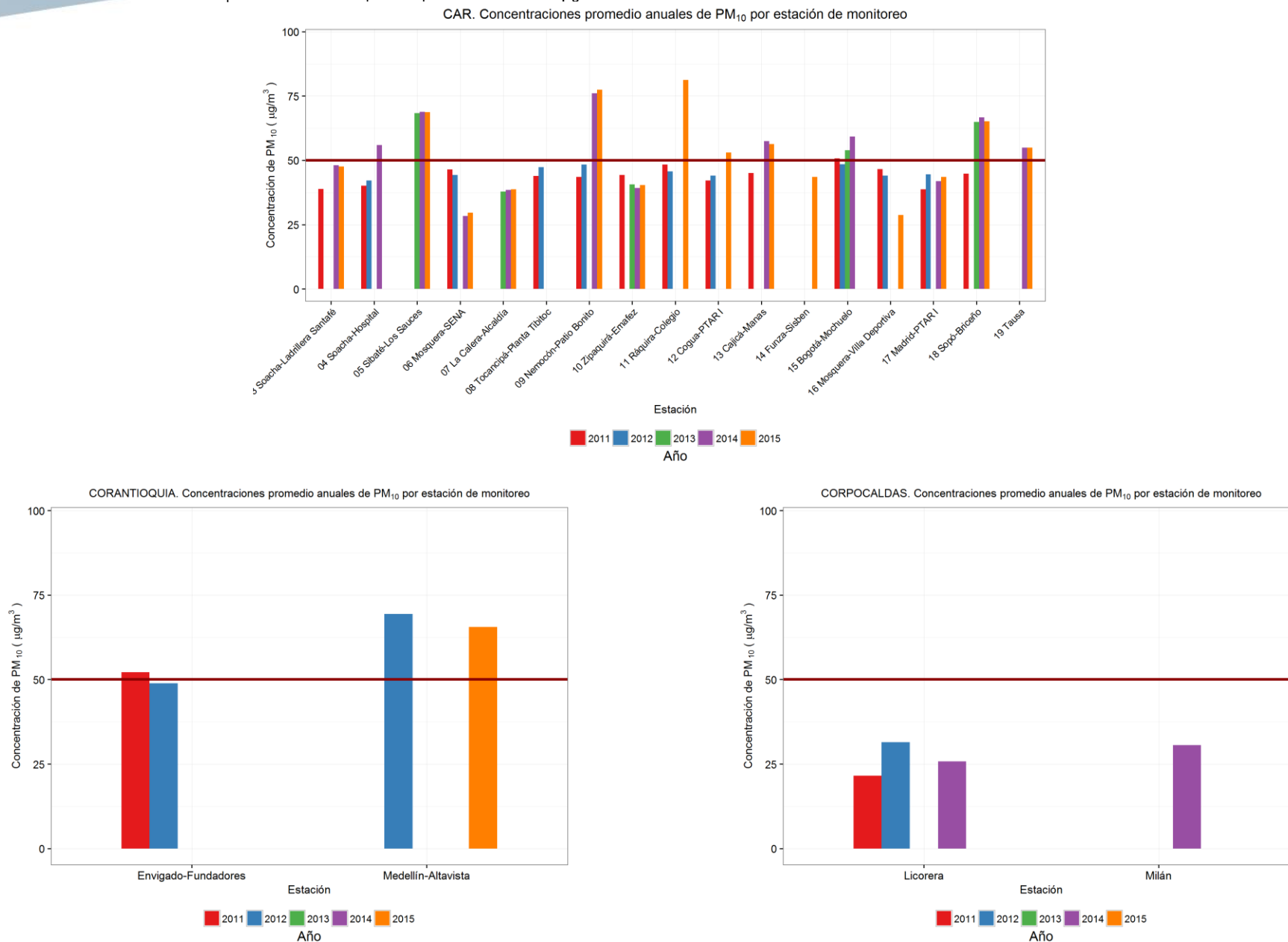


Figura 6-11. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CORPONARIÑO y CRQ con una cobertura temporal de mínimo 75%. La línea roja horizontal indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 50 µg/m³ de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

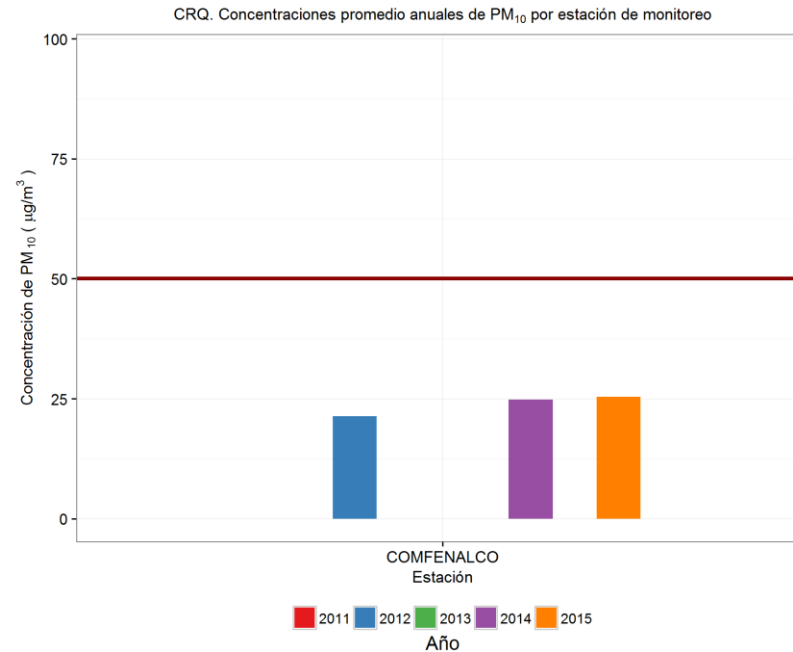
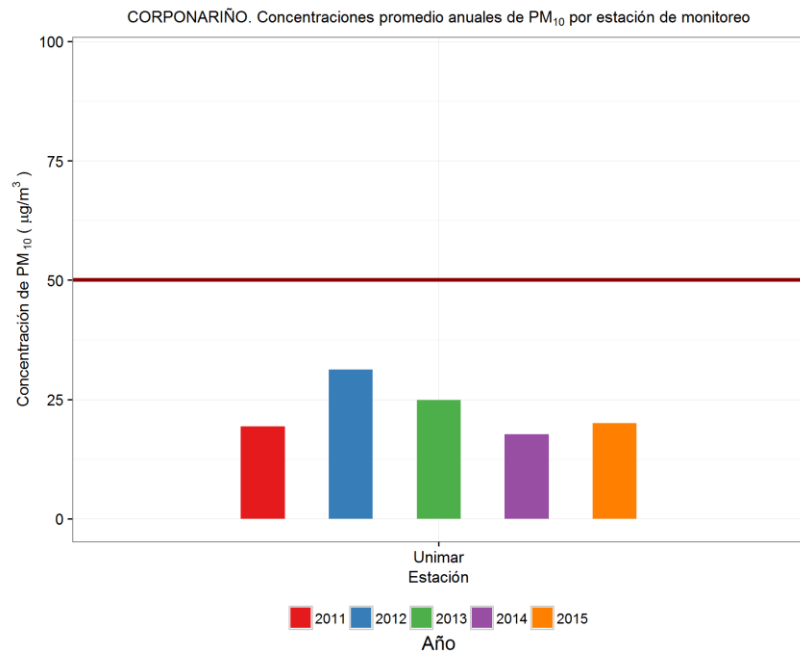


Figura 6-12. Número de días que exceden el límite máximo permisible de 100 µg/m³ de PM₁₀ en un tiempo de exposición diario, establecido de acuerdo con la Resolución 610 de 2010, para los SVCA de Colombia entre los años 2011 y 2014.

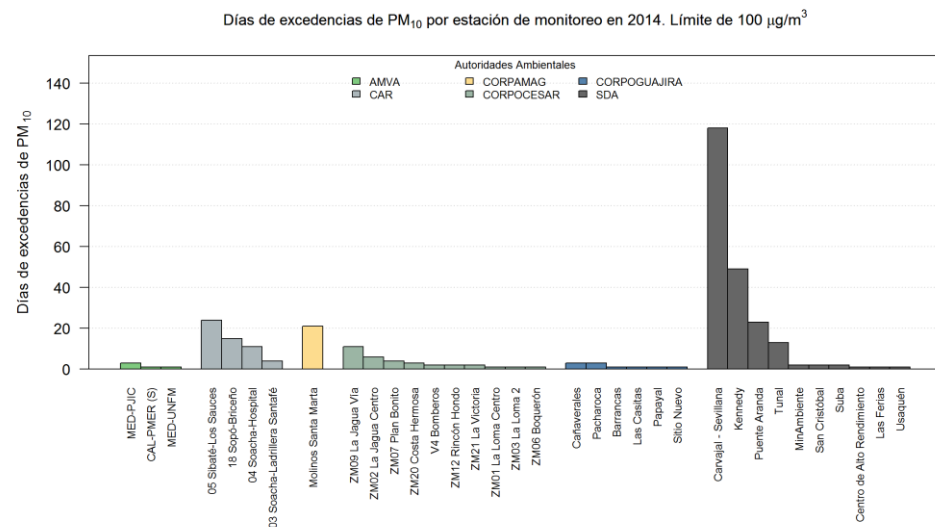
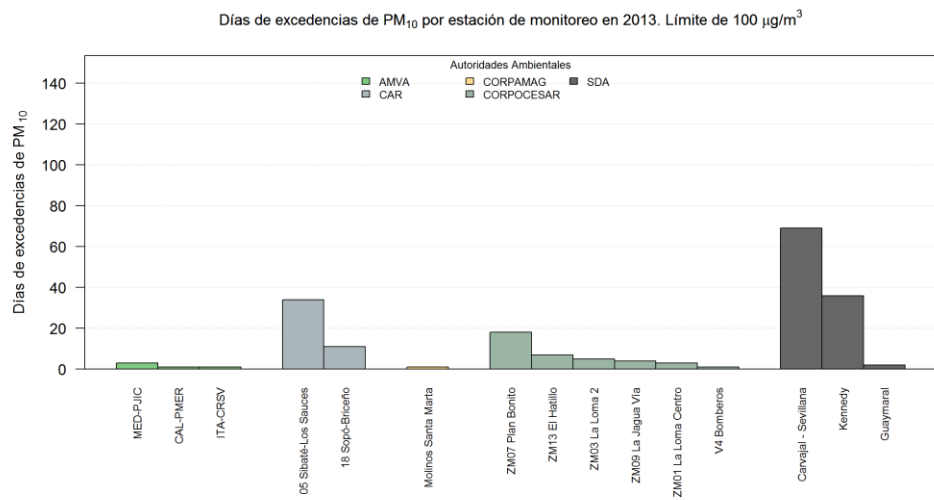
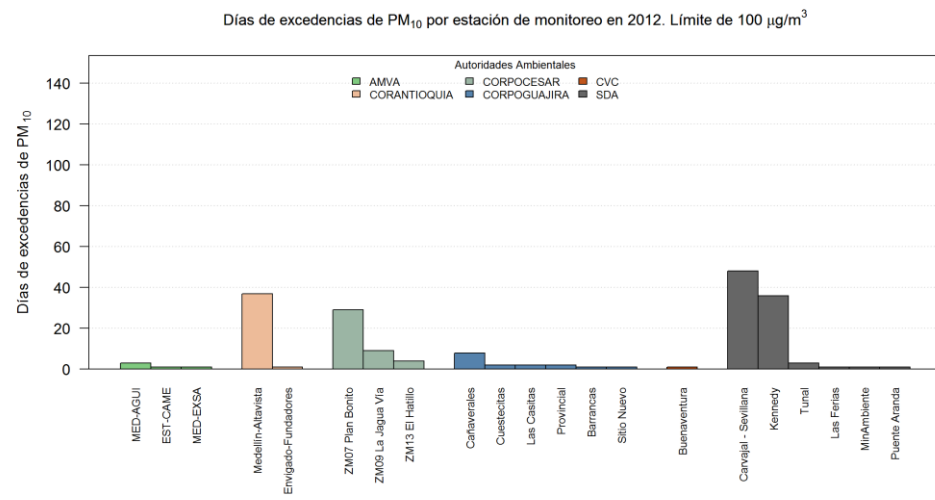
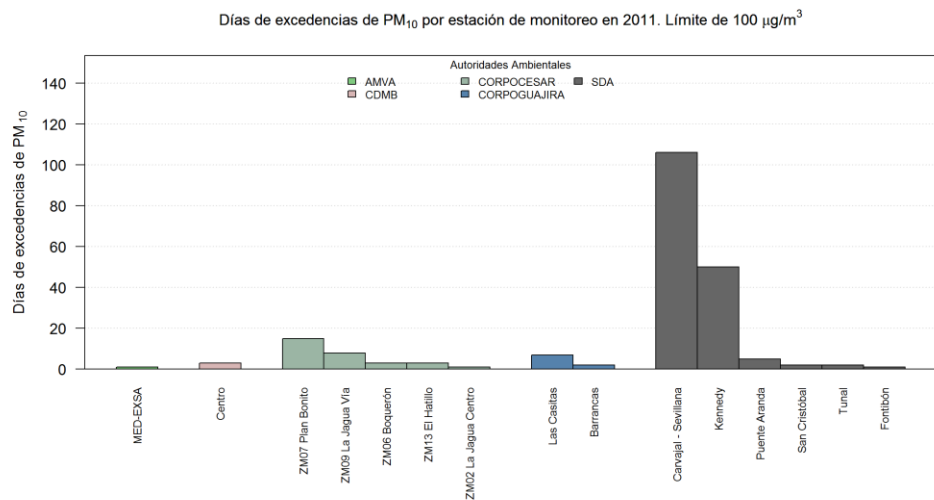
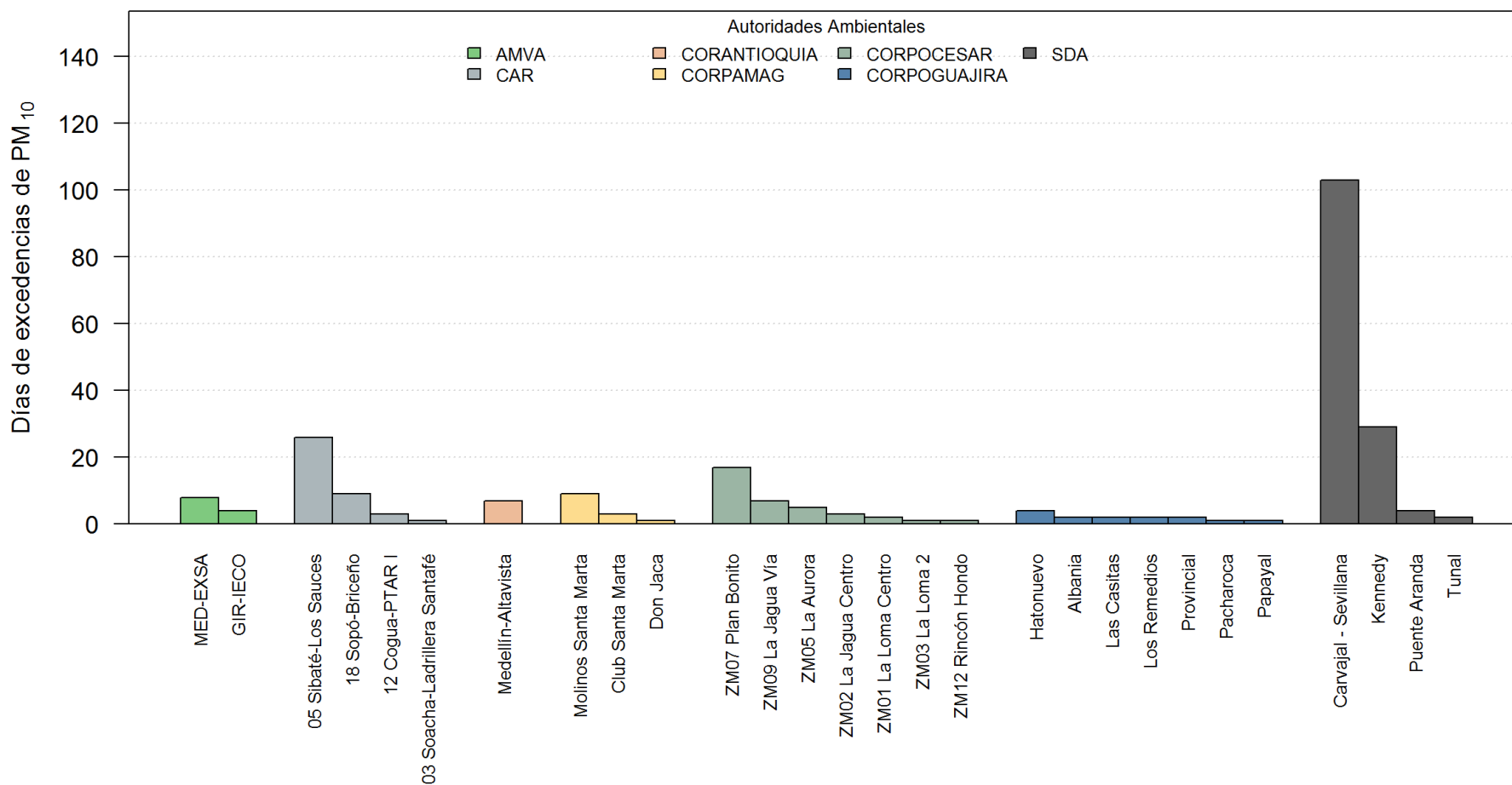
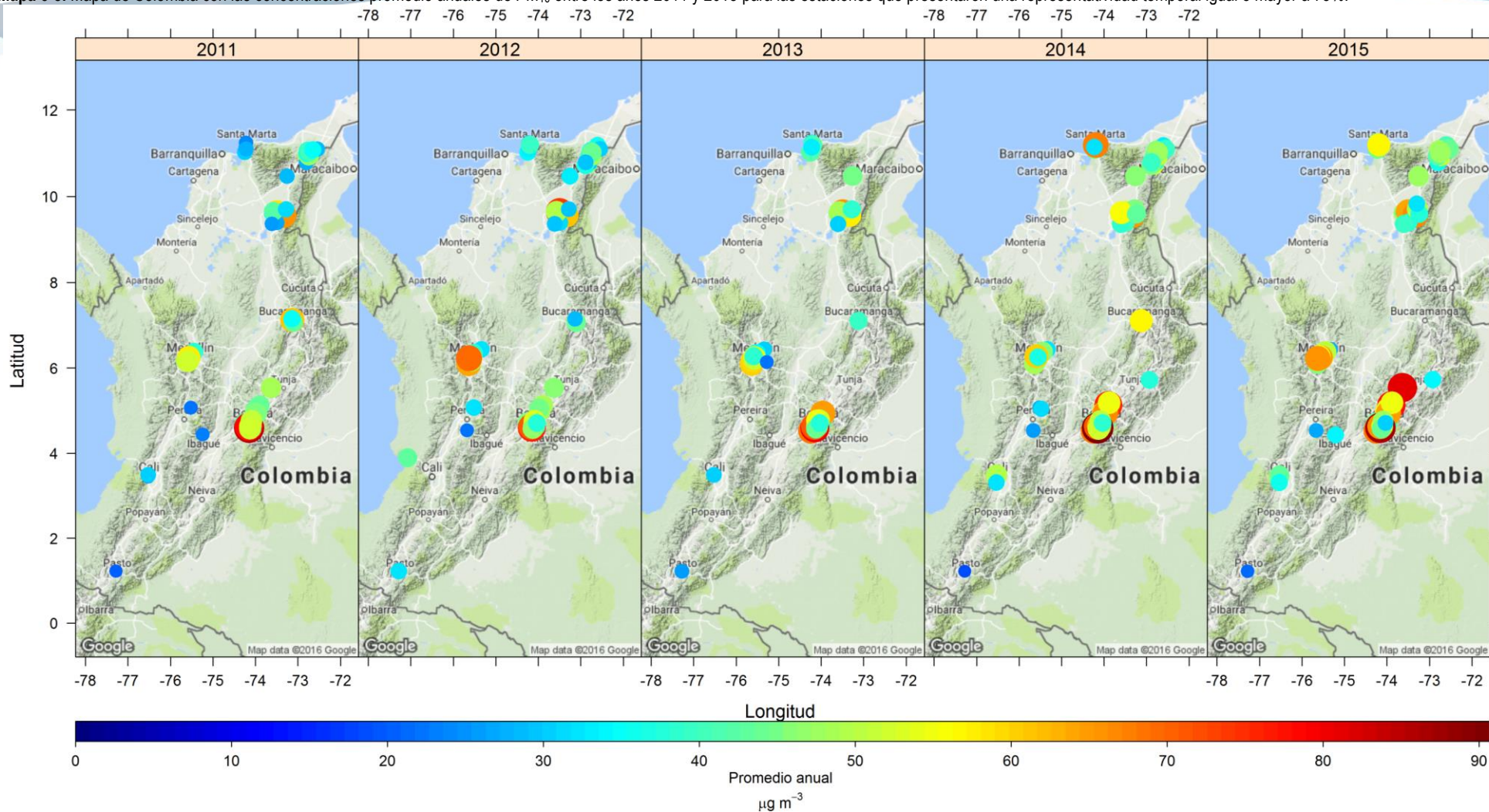


Figura 6-13. Número de días que exceden el límite máximo permisible de 100 µg/m³ de PM₁₀ en un tiempo de exposición diario, establecido de acuerdo con la Resolución 610 de 2010, para los SVCA de Colombia entre los años 2015.

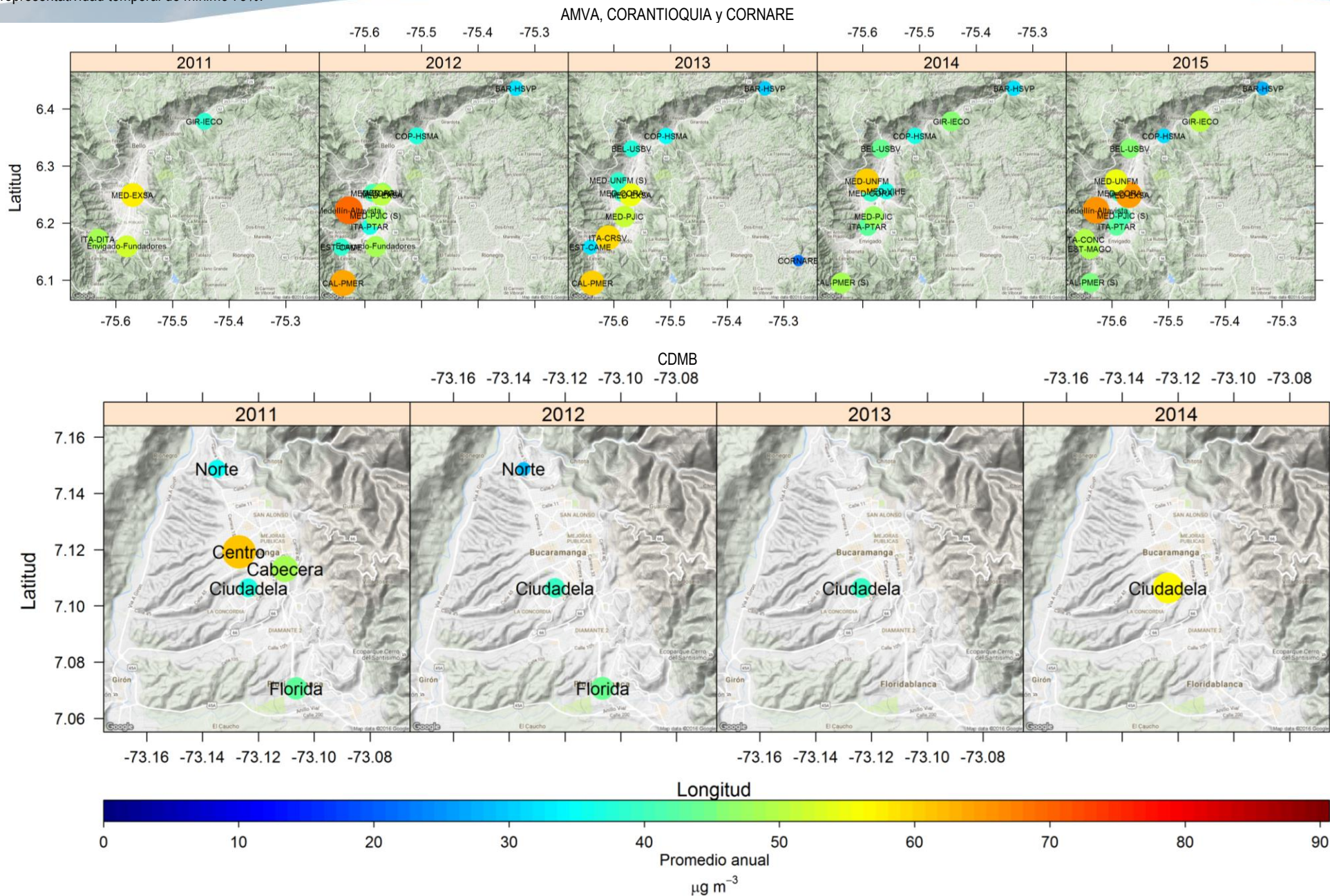
Días de excedencias de PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015. Límite de 100 µg/m³



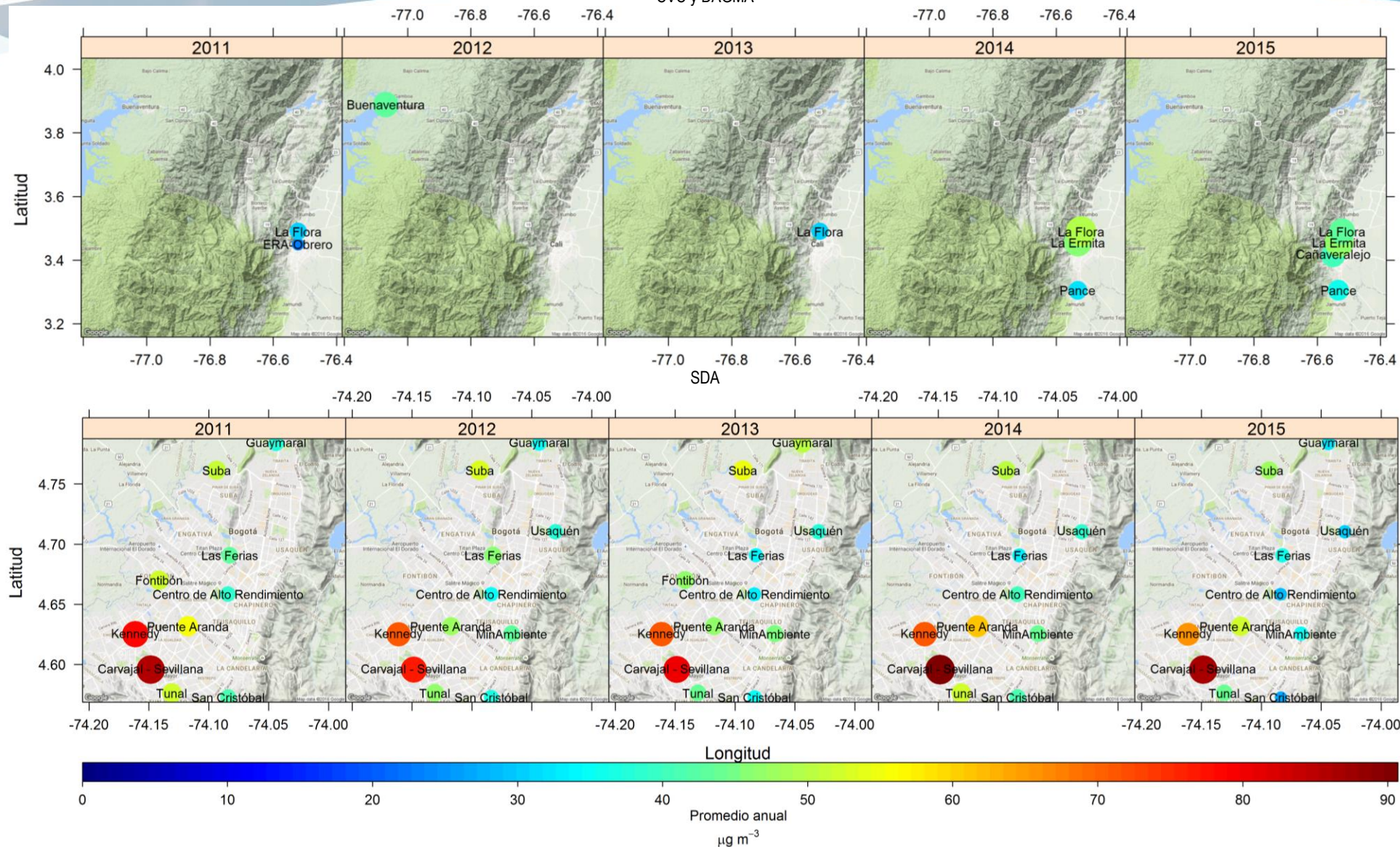
Mapa 6-5. Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre los años 2011 y 2015 para las estaciones que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.



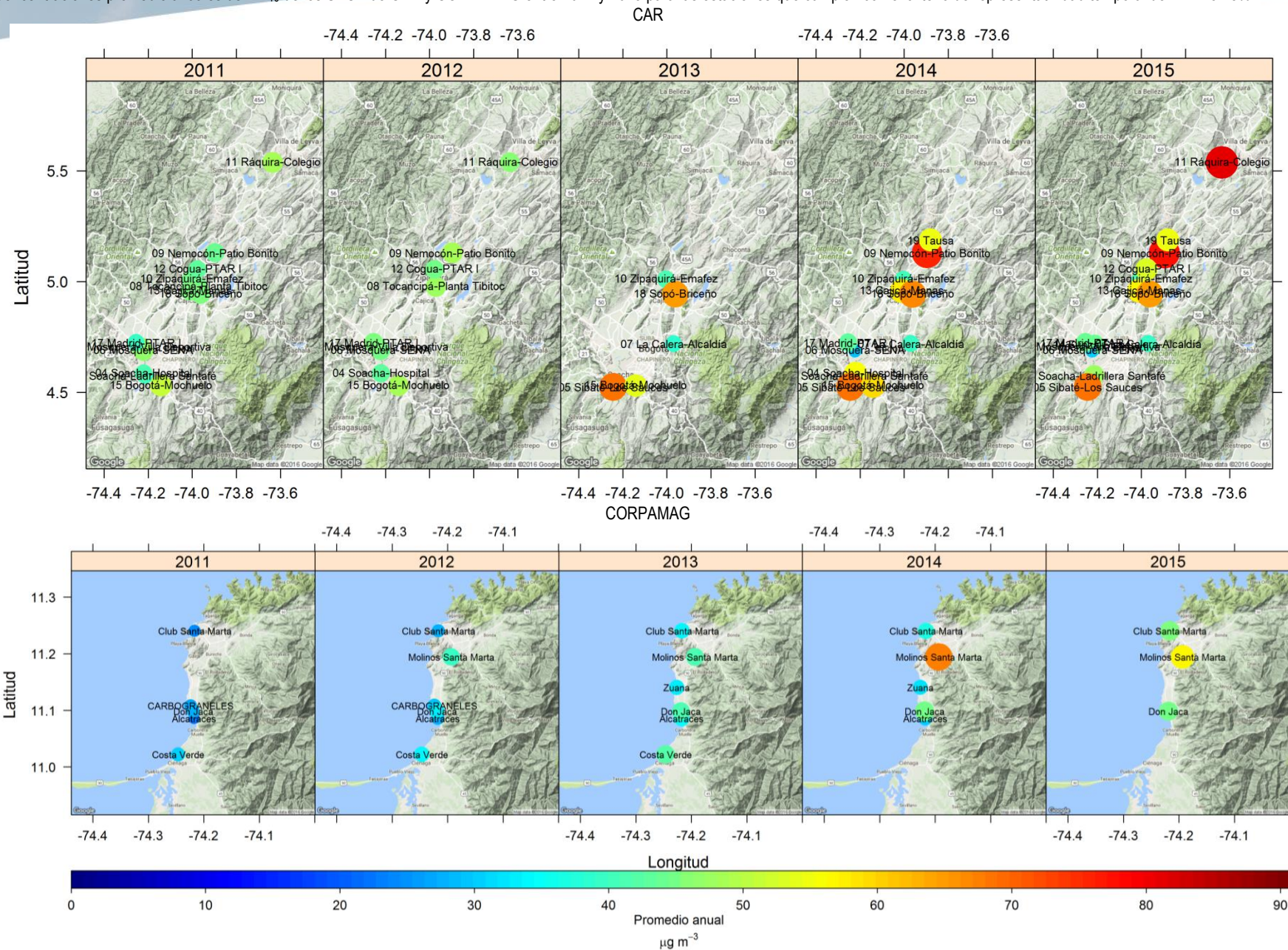
Mapa 6-6. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CORANTIOQUIA y CORNARE (arriba, 2011 a 2015), y CDMB (abajo, 2011 a 2014) que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.



Mapa 6-7. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA CVC y DAGMA (arriba) y SDA (abajo), que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.



Mapa 6-8. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ de los SVCA de CAR y CORPAMAG entre 2011 y 2015 para las estaciones que cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.



Mapa 6-9. Concentraciones promedio anuales de PM₁₀ de las estaciones del SVCA de la Zona Minera del Cesar (arriba, 2011 a 2015) y CORPOGUAJIRA (2011, 2012, 2014 y 2015) que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.

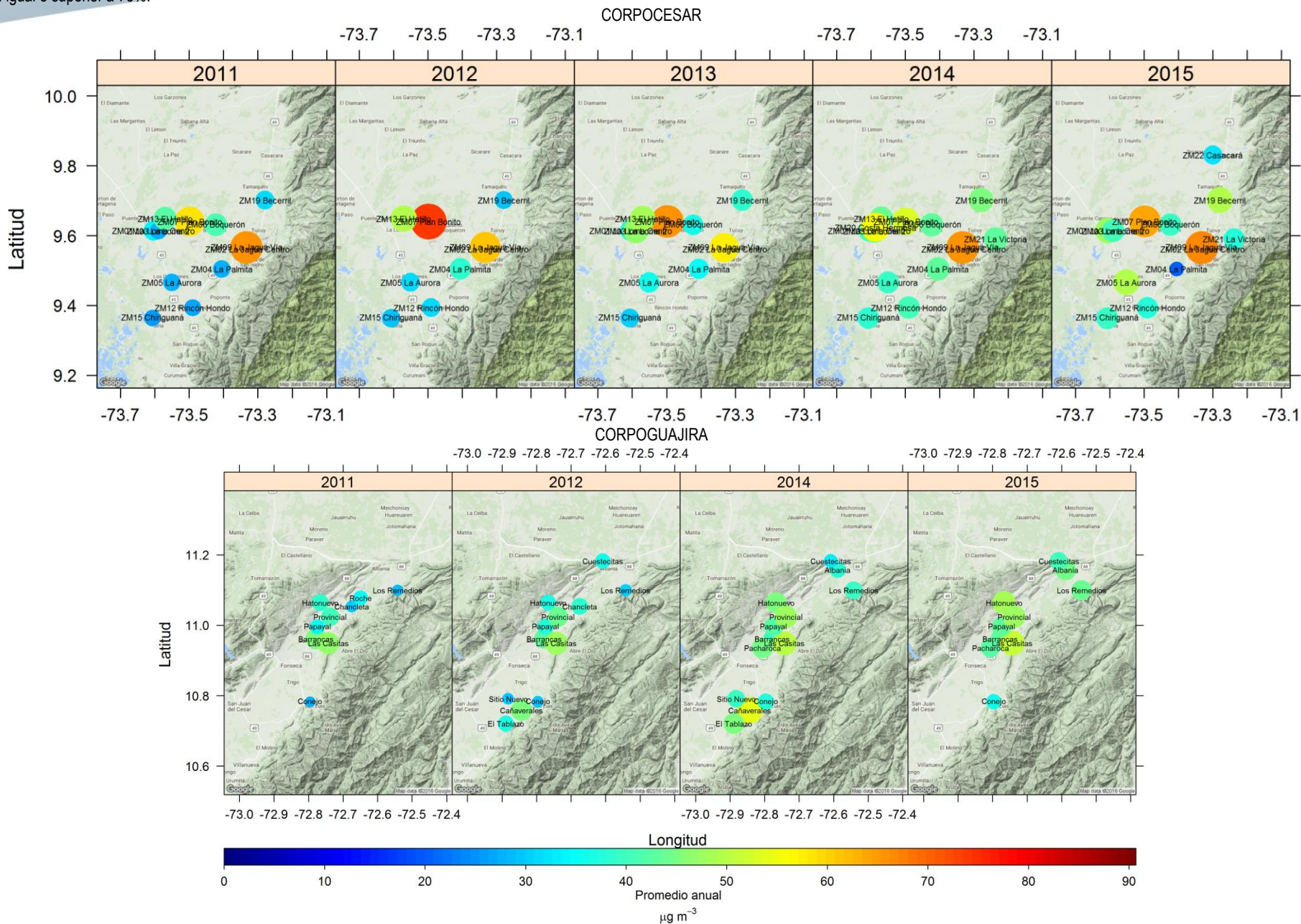


Figura 6-14. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire para PM₁₀ en las estaciones del SVCA de AMVA entre 2011 y 2015.

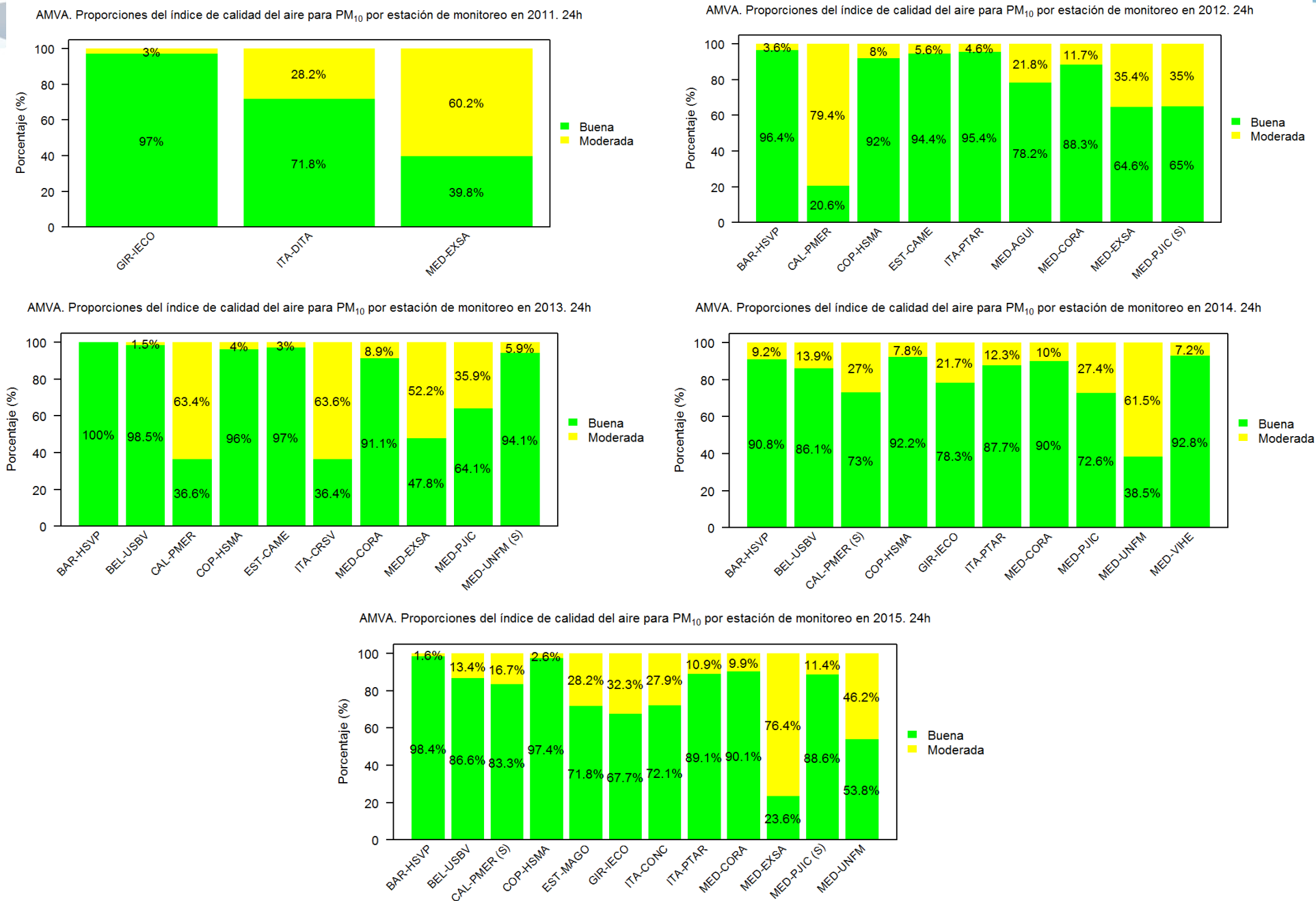
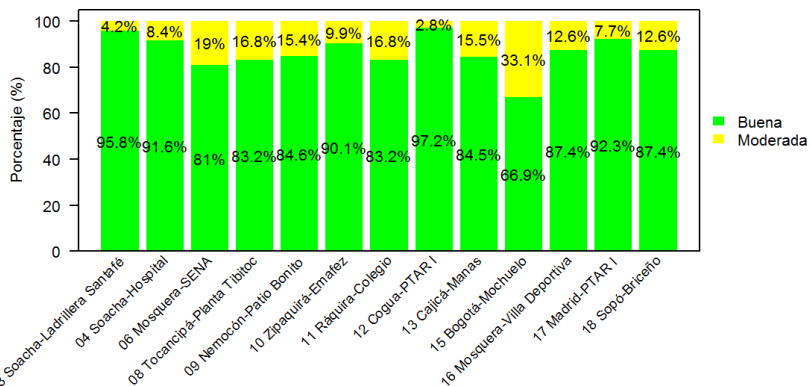
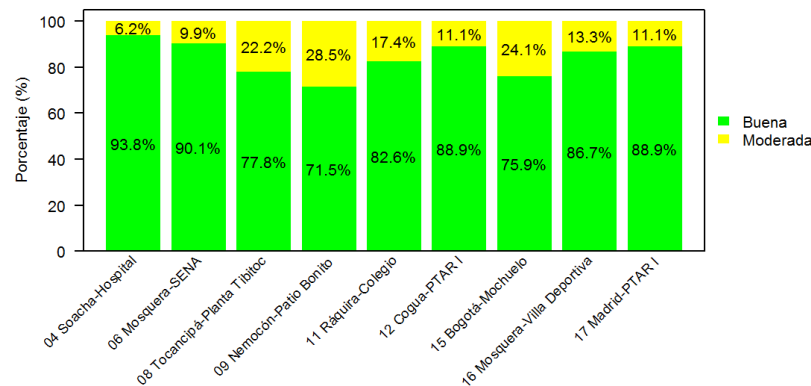


Figura 6-15. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire para PM₁₀ en las estaciones del SVCA de la CAR entre 2011 y 2015.

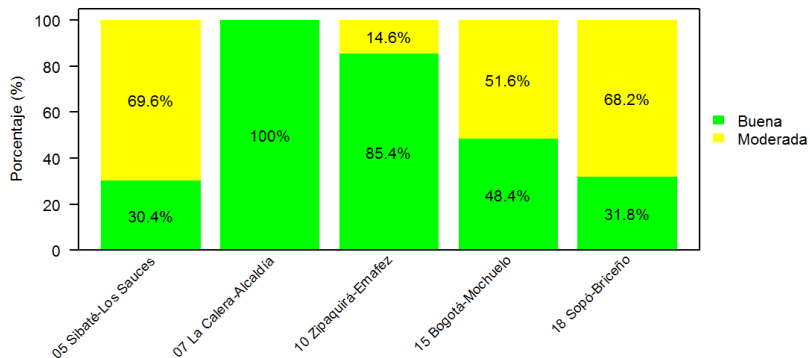
CAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2011. 24h



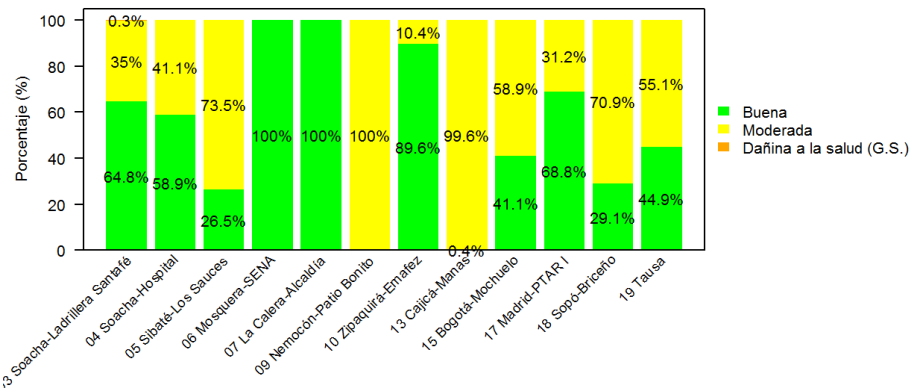
CAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2012. 24h



CAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2013. 24h



CAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2014. 24h



CAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015. 24h

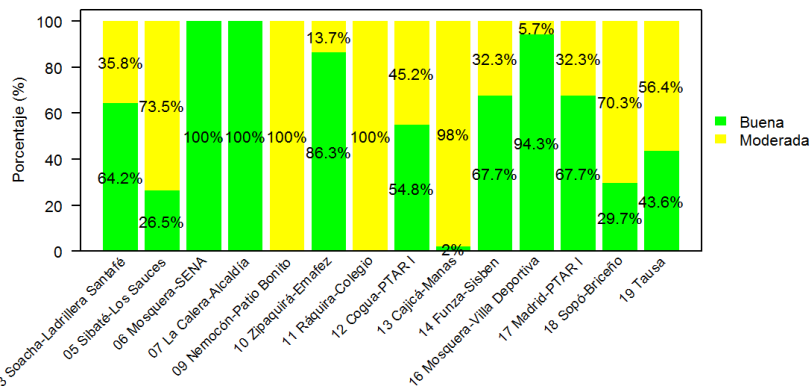
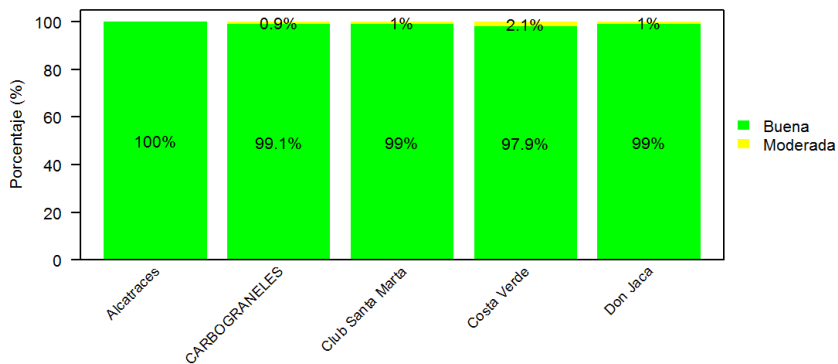
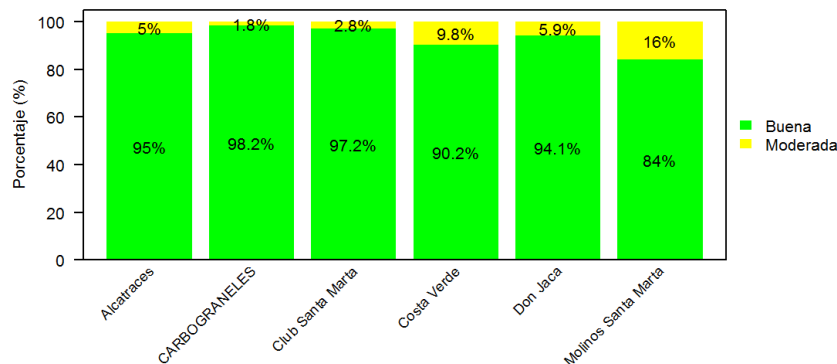


Figura 6-16. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM₁₀ en las estaciones del SVCA de CORPAMAG entre 2011 y 2015.

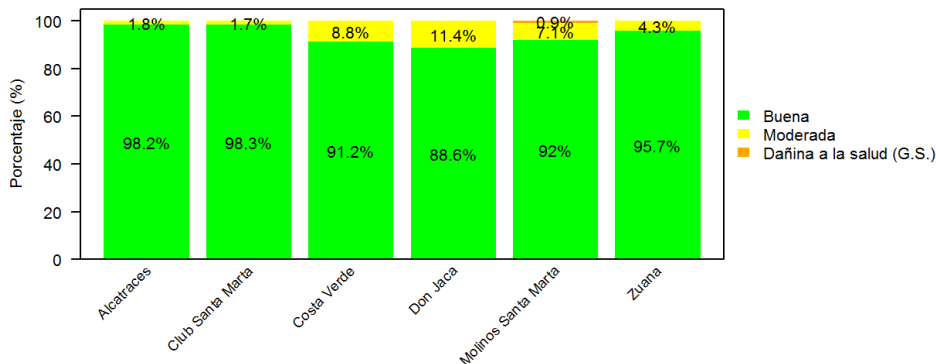
CORPAMAG. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2011. 24h



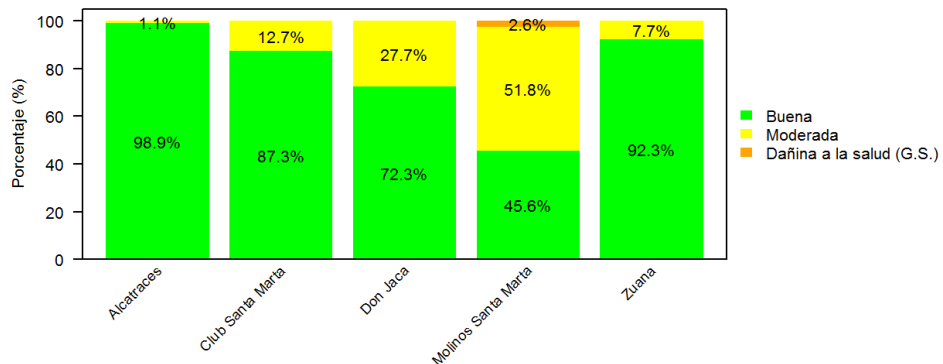
CORPAMAG. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2012. 24h



CORPAMAG. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2013. 24h



CORPAMAG. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2014. 24h



CORPAMAG. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015. 24h

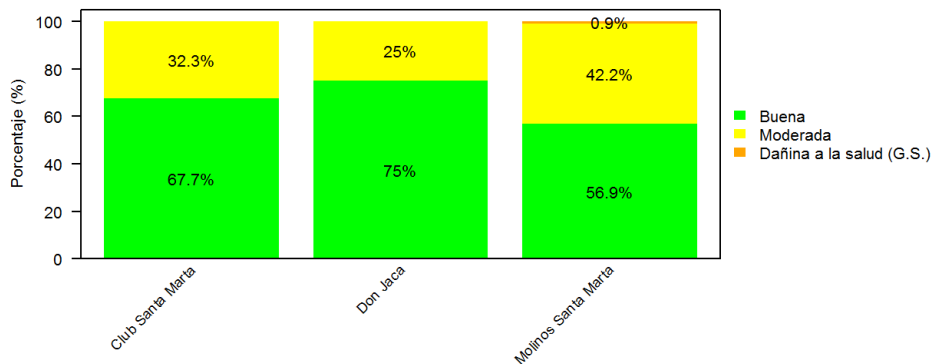
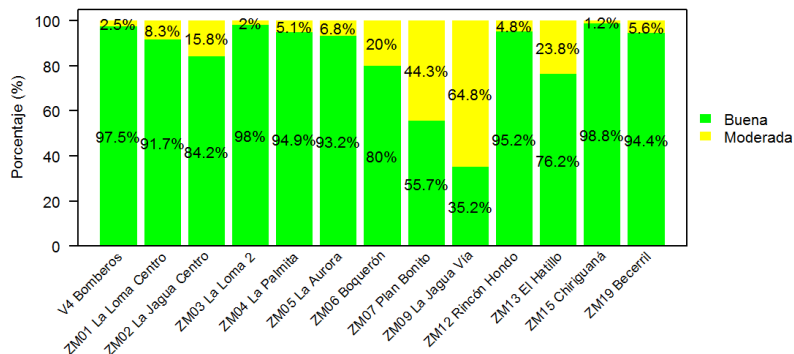
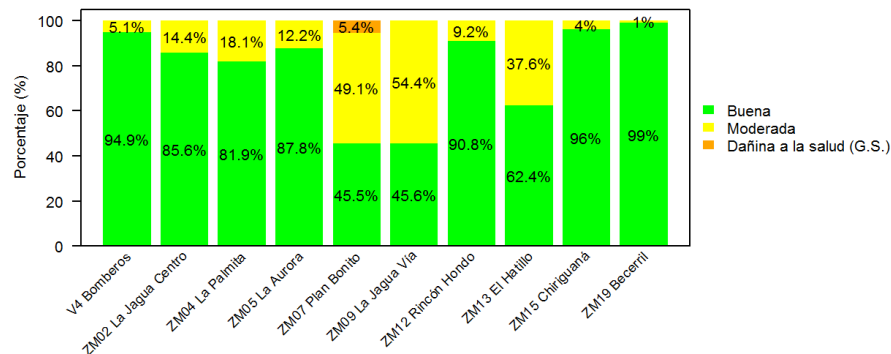


Figura 6-17. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM₁₀ en las estaciones del SVCA de CORPOCESAR entre 2011 y 2015.

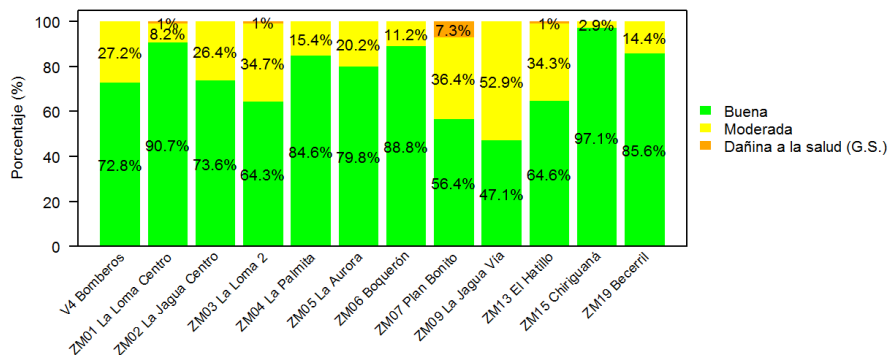
CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2011. 24h



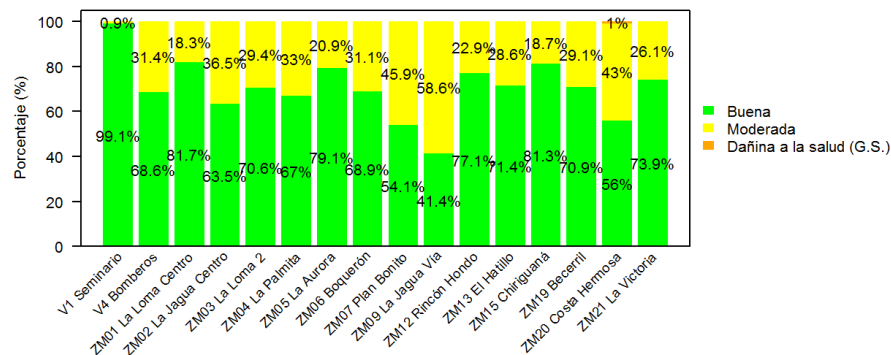
CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2012. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2013. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2014. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM₁₀ por estación de monitoreo en 2015. 24h

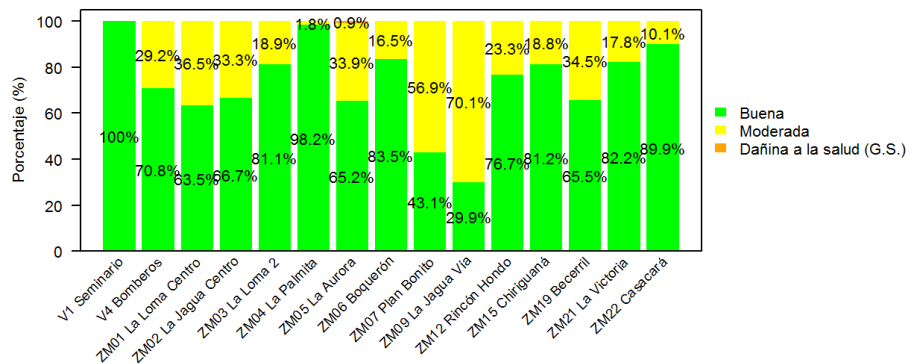
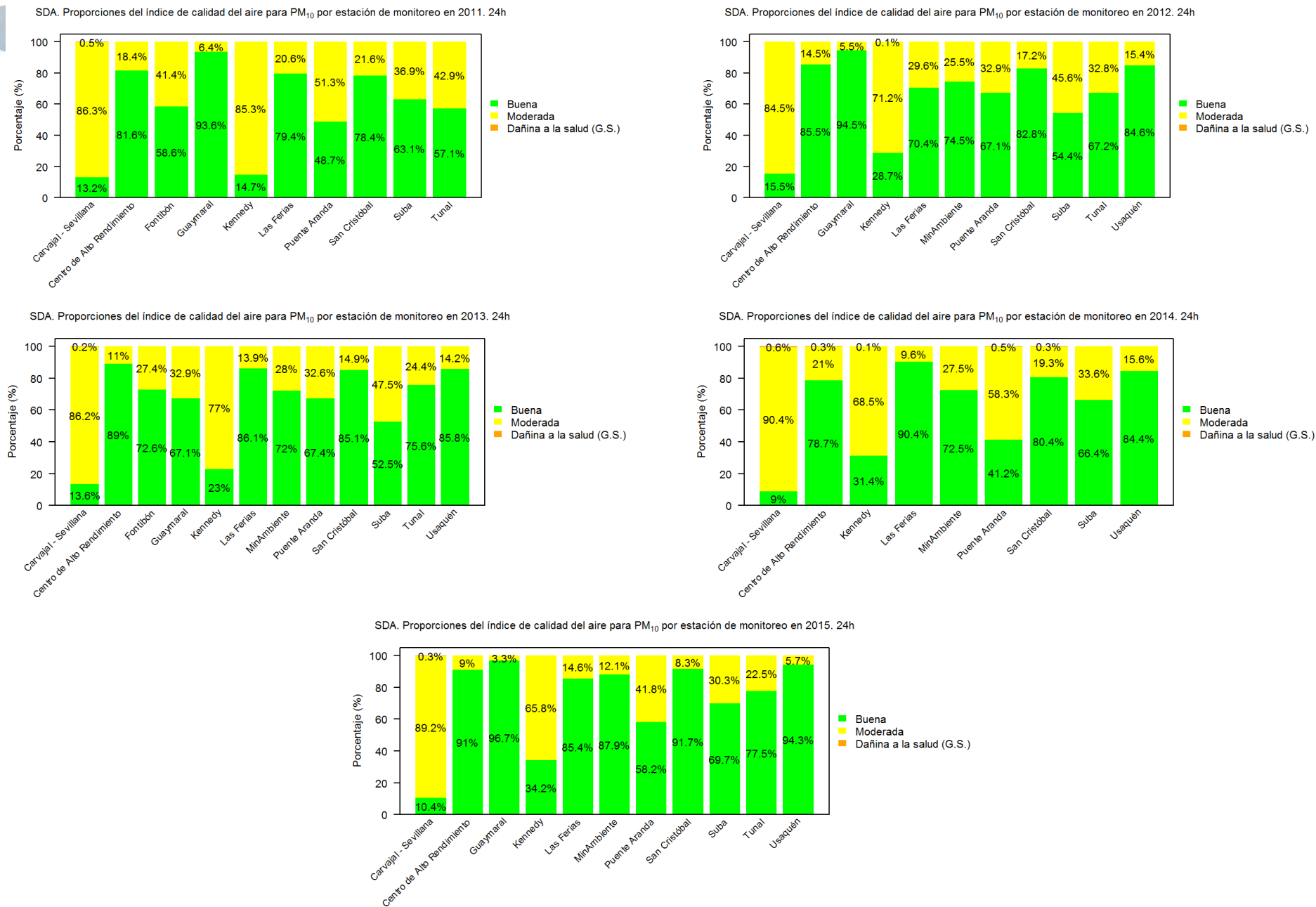


Figura 6-18. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire para PM₁₀ en las estaciones de la SDA entre 2011 y 2015.



6.3. Material particulado PM_{2.5}

Los límites máximos permisibles para PM_{2.5} son 25 µg/m³ en un tiempo de exposición anual y 50 µg/m³ en un tiempo de exposición diario. Este es el primer informe que muestra el comportamiento de este contaminante a nivel nacional teniendo en cuenta que en los últimos años sus puntos de monitoreo han estado incrementándose en el país. Por su tamaño de partícula, el PM_{2.5} representa efectos potenciales negativos a la salud de la población porque penetra más profundo en el aparato respiratorio, lo cual se evidencia al analizar los resultados del cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA).

6.3.1. Concentraciones promedio anuales

La Figura 6-19 y la Figura 6-20 presentan el comportamiento de las concentraciones anuales de PM_{2.5} entre 2011 y 2015 para los SVCA del país. Se observa que el número de equipos de medición se incrementó gradualmente en los años estudiados, especialmente en Bogotá (SDA), el Valle de Aburrá (AMVA) y la Zona Minera del Cesar (CORPOCESAR).

Los incumplimientos del límite máximo permisible anual se presentaron en las estaciones Corporación Lasallista (CAL – LASA, año 2015), Estación Metro La Estrella (Estación móvil, EST – METR, año 2015), Casa de Justicia Itagüí (ITA – CJUS, año 2015), Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC, año 2013), Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM, año 2015) y Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV, años 2013 a 2015) del Valle de Aburrá. En la Zona Minera del Cesar este límite fue excedido en 2015 por la estación Plan Bonito, lo cual está en concordancia con las tendencias observadas para PM₁₀.

En la ciudad de Bogotá el límite máximo permisible anual fue excedido en los cinco años analizados por las estaciones Kennedy y Carvajal – Sevillana, cuyos promedios anuales de PM_{2.5} se encuentran entre los más altos dentro de las estaciones del país que alcanzaron el criterio de cobertura temporal. En 2015 los niveles de estos sitios de monitoreo fueron superados por Estación Metro La Estrella (Estación móvil, EST – METR) y Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV) de AMVA, y Plan Bonito de CORPOCESAR, evidenciando un deterioro progresivo de la calidad del aire en comparación con años previos.

Aunque no presentó incumplimiento, la concentración anual de la estación Envigado – Fundadores de CORANTIOQUIA se ubicó justo en el límite máximo permisible.

6.3.2. Tendencias entre 2011 y 2015

Las tendencias interanuales de PM_{2.5} para los SVCA del Valle de Aburrá (AMVA), de la ciudad de Manizales (CORPOCALDAS), de la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR) y de la ciudad de Pasto (CORPONARIÑO) se presentan en la Figura 6-21, mientras que las correspondientes a la ciudad de Cali (DAGMA) y Bogotá (SDA) se encuentran en la Figura 6-22.

En el caso del Valle de Aburrá, en las estaciones Corporación Lasallista (CAL – LASA) y Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV) de AMVA se observó un aumento progresivo de las concentraciones anuales entre 2013 y 2015 y para Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM) entre 2013 y 2014; en Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) se evidenció una tendencia contraria de disminución entre 2013 y 2015.

Los dos promedios anuales de la estación Licorera de CORPOCALDAS en 2012 y 2014 muestran una leve reducción de la concentración sugiriendo una posible mejora en la calidad del aire de la zona, lo cual requiere mayor robustez en los datos para ser confirmado.

En la jurisdicción de CORPOCESAR se observa un aumento gradual de la concentración para las estaciones La Jagua Centro entre 2011 y 2014 y Plan Bonito de 2013 a 2015, especialmente en este último año. Estos

también fueron los sitios con la mayor concentración de PM_{10} , evidenciando una creciente importancia de la influencia del material particulado fino en la zona. En La Loma Centro, por el contrario, se observó una disminución entre 2014 y 2015.

En la ciudad de Pasto (CORPONARIÑO) las series anuales de la estación IDSN de 2014 y 2015 no evidencian una variación significativa de las concentraciones anuales de $PM_{2.5}$ y ambas cumplen con el límite máximo permisible. Las dos concentraciones promedio anuales de la estación Universidad del Valle de DAGMA de los años 2014 y 2015 muestran un incremento en la concentración, aunque cumpliendo igualmente con el límite máximo permisible.

Con respecto a la ciudad de Bogotá, entre 2011 y 2013 solamente es posible analizar las tendencias en la estación Kennedy en la cual se observa una mejora progresiva de la calidad del aire al comparar los niveles de 2011 y de 2015; sin embargo, en todos los casos se superó el límite máximo permisible. Para Carvajal – Sevillana, Centro de Alto Rendimiento, Tunal y Usaquén, la concentración de $PM_{2.5}$ disminuyó en 2015 con respecto a 2014, evidenciando una mejora de la calidad del aire en sus zonas de influencia.

Para las demás zonas que cumplen con el criterio de representatividad temporal no es posible un análisis de evolución temporal al no disponer de información suficiente para llevar a cabo las respectivas comparaciones.

6.3.3. Excedencias del límite máximo permisible diario

El comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en comparación con el límite máximo permisible diario se encuentra en la Figura 6-23 y en la Figura 6-24, donde se muestra el número de días de excedencias en cada año entre 2011 y 2015. La estación Kennedy ha presentado incumplimientos en todos los años estudiados los cuales oscilan entre 4 días en 2013 y 17 días en 2014. Con información adicional de nuevos equipos de $PM_{2.5}$ en 2014, se puede obtener información de la calidad del aire de sus zonas de influencia y evidenciar que el $PM_{2.5}$ igualmente presenta excedencias en Tunal, Carvajal – Sevillana, Suba, Centro de Alto Rendimiento y Ministerio de Ambiente.

En el caso del Valle de Aburrá, el número de excedencias presentó un incremento notable en 2015, especialmente con la Estación Metro La Estrella (Estación móvil, EST – METR) con 148 días, lo cual establece un amplio contraste con las demás estaciones del país en las cuales esta variable alcanza a lo sumo 17 días. Esta estación es seguida por Corporación Lasallista (CAL – LASA) y Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV) con 12 días cada una.

Con respecto a CORPOCESAR, la estación Plan Bonito registró un número relativamente alto de días de excedencias en el año 2015 con 17, estableciendo un contraste con 2013 y 2014 los cuales no presentaron incumplimientos.

Para los demás SVCA se observaron excedencias en Envigado – Fundadores de CORANTIOQUIA y Licorera de CORPOCALDAS en 2012, Universidad del Valle de la ciudad de Cali (DAGMA) en 2014 y en la estación IDSN de Pasto (CORPONARIÑO) en 2015. Todas estas estaciones presentaron un día de excedencia, exceptuando Licorera que evidenció dos.

6.3.4. Mapas de las concentraciones promedio

En el Mapa 6-10 se presenta la distribución espacial de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ entre 2011 y 2015. Conforme a lo mencionado en apartes anteriores, se evidencia un incremento de la oferta de información en 2014 y 2015 en comparación con años previos, especialmente en la ciudad de Bogotá. A nivel nacional se observa que las concentraciones más altas se presentan en las áreas urbanas de la capital de Colombia y de Medellín, lo cual está acorde con las características en cuanto a las actividades y emisiones

asociadas de estas zonas. También se observa un incremento en la concentración de $PM_{2.5}$ en la Zona Minera del Cesar en 2015.

Para visualizar con mayor detalle las tendencias espaciales en las regiones analizadas, el Mapa 6-11 y el Mapa 6-12 presentan acercamientos en las jurisdicciones del Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA), en las ciudades de Pereira y Manizales (CARDER y CORPOCALDAS), en la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR), donde se observa un aumento en el número de estaciones con representatividad temporal igual o superior a 75% con el transcurrir de los años, y en la ciudad de Bogotá (SDA), donde sólo operaba Kennedy hasta octubre de 2013 y posteriormente entraron en operación nuevos equipos de monitoreo de $PM_{2.5}$.

6.3.5. Índice de Calidad del Aire.

Las proporciones del Índice de Calidad del Aire (ICA) para $PM_{2.5}$ serán presentadas inicialmente para aquellas estaciones de los SVCA cuyos datos permiten visualizar comportamientos en los cinco años analizados. En este sentido se muestran los resultados para el Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA), la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR) y la ciudad de Bogotá (SDA). En general se observa que la participación de la categoría “Buena” es inferior en comparación con los resultados correspondientes al PM_{10} . Este hecho evidencia que el $PM_{2.5}$ tiene mayor potencial de afectar negativamente la salud de la población dado que su tamaño de partícula es menor y puede ingresar con mayor facilidad y alojarse más profundamente en los pulmones (USEPA, 2015). Los efectos potenciales a la salud de este contaminante según las categorías de ICA son los mismos que fueron descritos para el PM_{10} , de acuerdo con la sección 6.2.6

El comportamiento del ICA en el Valle de Aburrá se presenta en la Figura 6-25 y corresponde a los SCVA de AMVA en los años 2011, 2013, 2014 y 2015, y CORANTIOQUIA en el 2012. En los cinco años estudiados se observa la participación de las categorías “Buena”, “Moderada” y “Dañina a la Salud para Grupos Sensibles”, demostrando el potencial de afectación de este contaminante en esta región del país. En los años 2014 y 2015 aparece la categoría “Dañina a la salud” en las estaciones Corporación Lasallista (CAL – LASA; 2014 y 2015) y Estación Metro La Estrella (Estación móvil; EST – METR; 2015). Esta categoría representa un incremento de los síntomas de las enfermedades relacionadas con el corazón o los pulmones y mortalidad prematura en personas con enfermedades cardiopulmonares y en adultos mayores y aumento de los efectos respiratorios en la población en general. Se destaca que para EST – METR ningún momento se enmarcó en la categoría “Buena”.

La Figura 6-26, que muestra la distribución de las categorías para CORPOCESAR, evidencia un deterioro progresivo de la calidad del aire en la zona de influencia de la estación La Jagua Centro; entre 2011 y 2014 donde la proporción de la categoría “Moderada” fue aumentando progresivamente y a partir de 2013 se evidenciaron momentos con una calidad del aire “Dañina a la salud para grupos sensibles”. Un comportamiento similar fue observado para la estación Plan Bonito entre 2013 y 2015 donde la proporción de días con una calidad del aire “Buena” fue disminuyendo, y en 2015 se presentaron episodios con categoría “Dañina a la salud”, representando el 9,1% de los datos disponibles.

Las proporciones del ICA para $PM_{2.5}$ en Bogotá merecen especial atención en términos de deterioro de la calidad del aire. Como se mencionó previamente, la disponibilidad de equipos en este SVCA aumentó a partir de octubre de 2013 dando lugar al aumento de la cobertura del monitoreo de este contaminante. Con excepción del año 2013, se observa la participación de la categoría “Dañina a la salud”, especialmente en las estaciones Carvajal – Sevillana y Kennedy, localizadas en la zona suroccidental, y en Tunal, ubicada en el sur. Por otra parte, las estaciones Ministerio de Ambiente, San Cristóbal y Usaquén, ubicadas al oriente de la ciudad presentaron predominantemente horas con la categoría “Buena”.

En la Figura 6-28 se presenta la proporción de las categorías del ICA para las ciudades de Pereira y Bucaramanga en 2011, Manizales en 2012 y 2014 y Pasto en 2014 y 2015. La estación Pereira – CARDER presentó una calidad del aire predominantemente “Buena”; en la estación Centro de Bucaramanga, prevaleció una calidad del aire “Moderada” con una participación menor de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles”; la estación Licorera de Manizales no muestra una tendencia evidente ya que, aunque la categoría dañina a la salud no aparece en 2014, aumenta la proporción de momentos con calidad del aire “Moderada”; para IDSN de CORPONARIÑO predomina la categoría “Buena” en más del 90% del tiempo pero se observó una leve participación de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles” en 2015.

Las proporciones de ICA en la ciudad de Cali (DAGMA) muestran participación de las categorías “Dañina a la salud para grupos sensibles” y “Dañina a la salud” en el año 2014, las cuales estuvieron inexistentes en 2015 pero con un aumento de la participación de la categoría “Moderada”.

Figura 6-19. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} entre 2011 y 2014 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 25 µg/m³ establecido según la Resolución 610 de 2010.

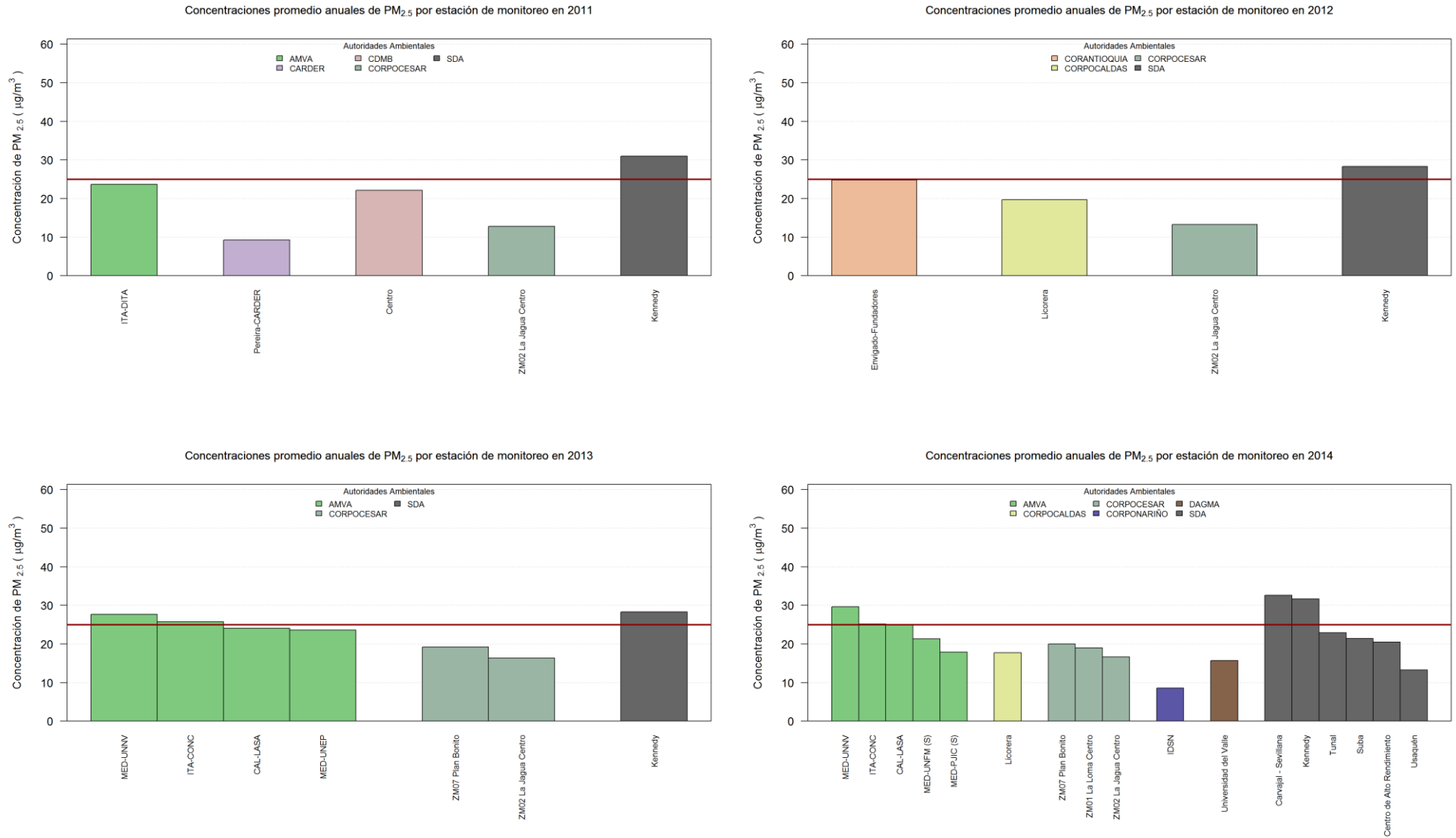


Figura 6-20. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} en 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%. La línea roja indica el límite máximo permisible en un tiempo de exposición anual de 25 µg/m³ establecido según la Resolución 610 de 2010.

Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015

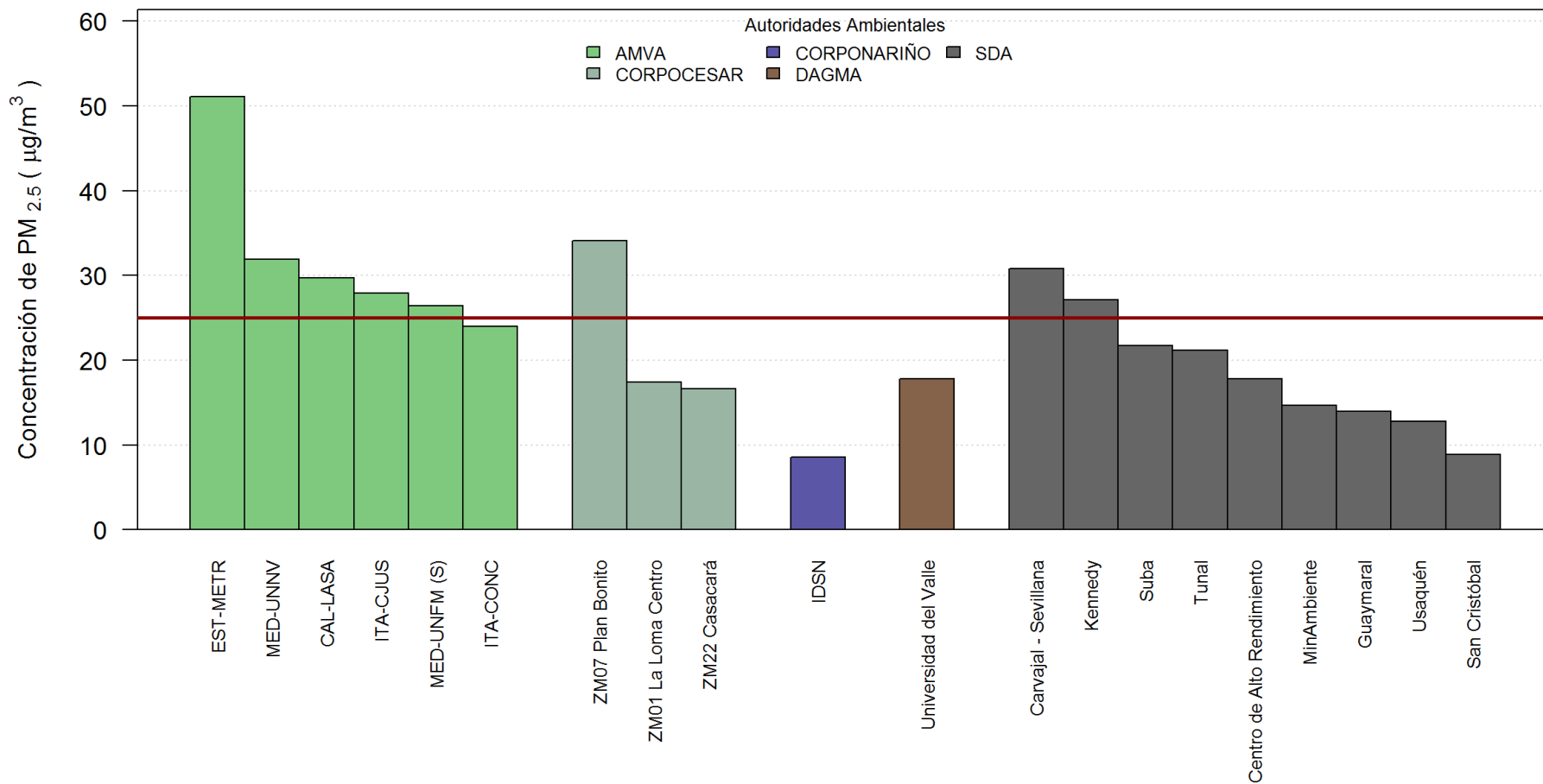
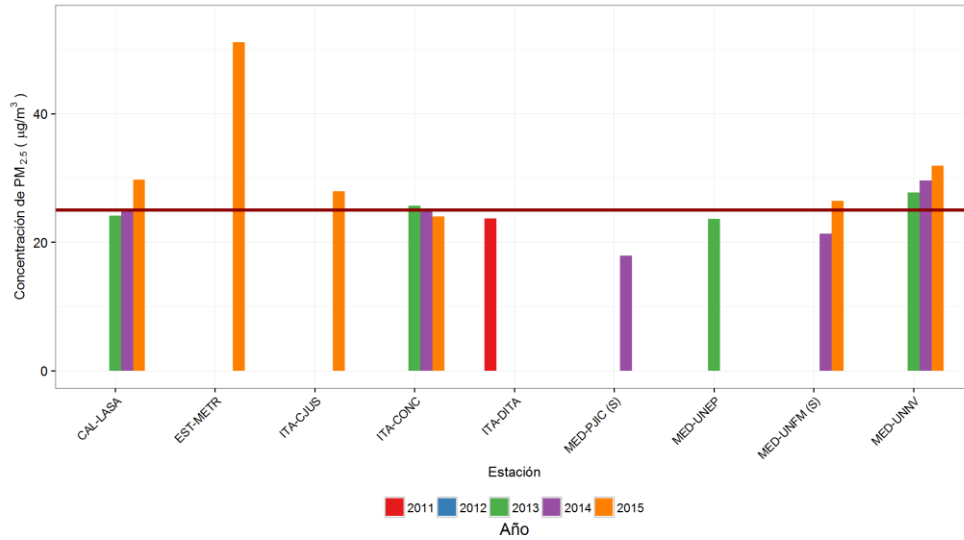


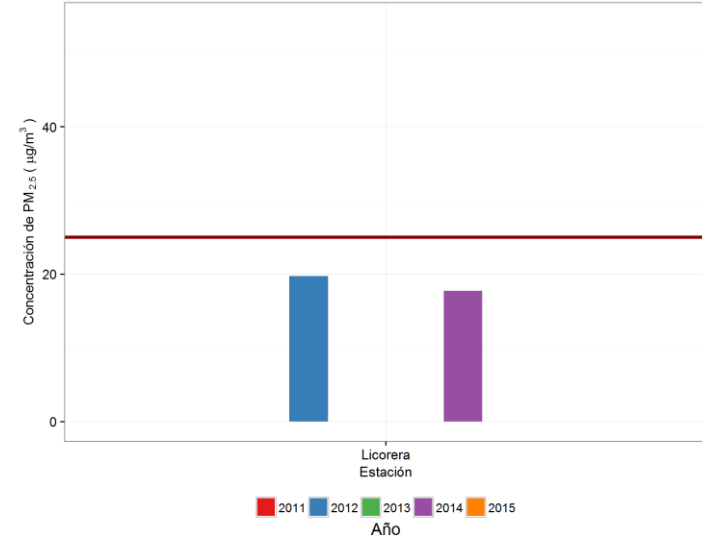
Figura 6-21. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA AMVA, CORPOCALDAS, CORPOCESAR y CORPONARIÑO que cumplieron con el criterio de cobertura temporal de mínimo 75%.

La línea roja corresponde al límite máximo permisible de 25 µg/m³ en un tiempo de exposición anual de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

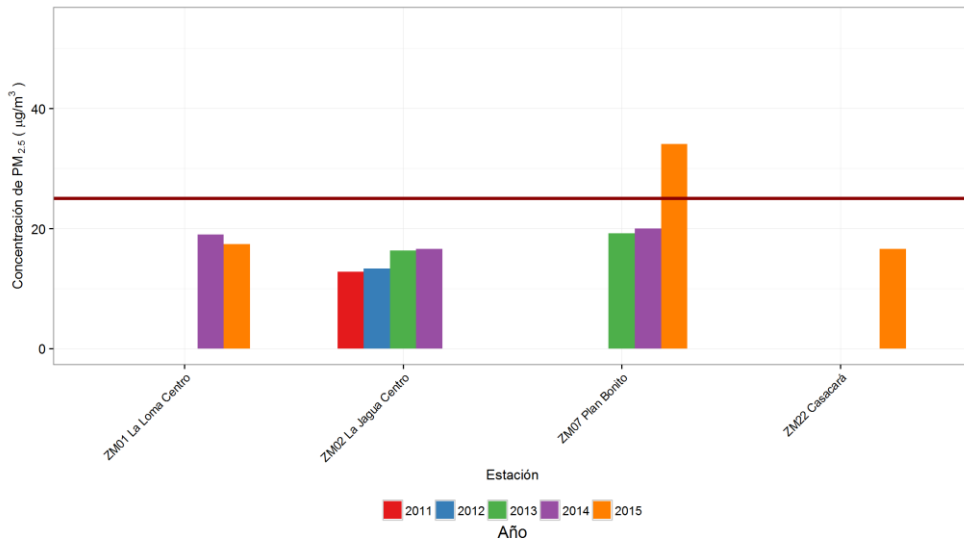
AMVA. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación de monitoreo



CORPOCALDAS. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación de monitoreo



CORPOCESAR. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación de monitoreo



CORPONARIÑO. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} por estación de monitoreo

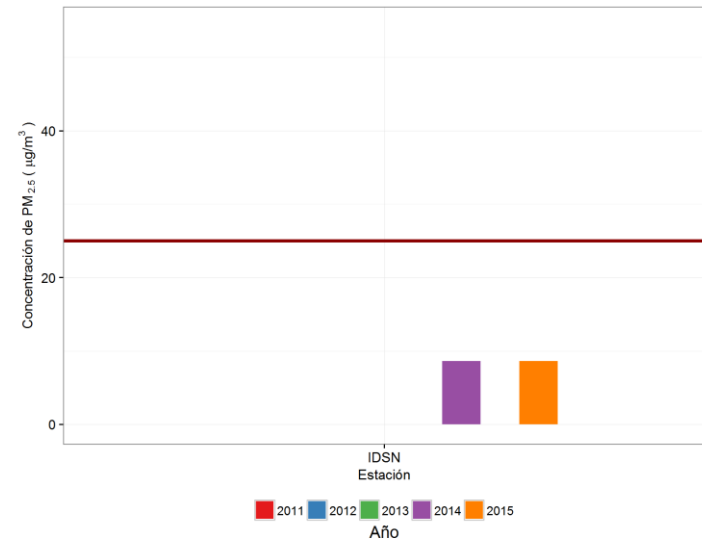


Figura 6-22. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA DAGMA y SDA que cumplieron con el criterio de cobertura temporal de mínimo 75%. La línea roja corresponde al límite máximo permisible de 25 µg/m³ en un tiempo de exposición anual de acuerdo con la Resolución 610 de 2010.

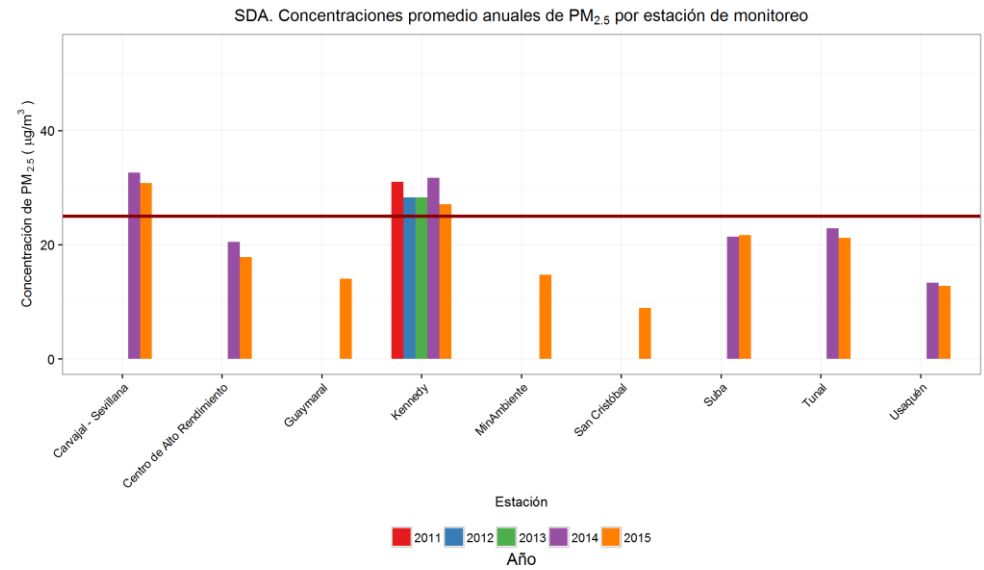
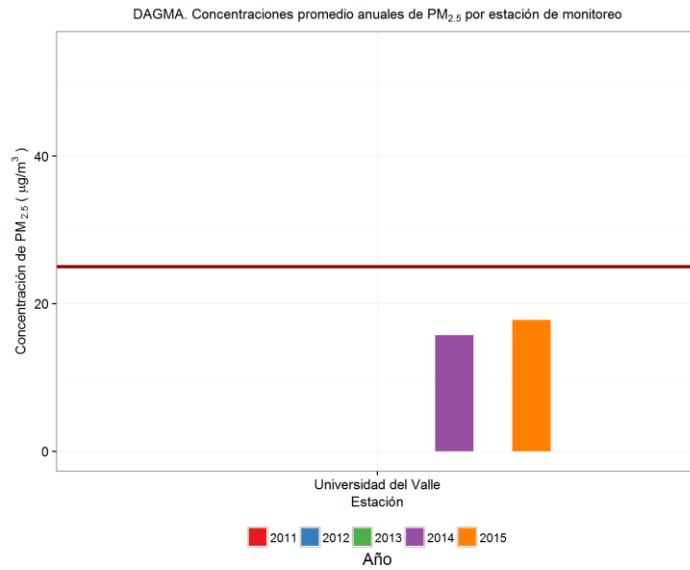


Figura 6-23. Días de excedencias de $PM_{2.5}$ del límite máximo permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un tiempo de exposición diario entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.

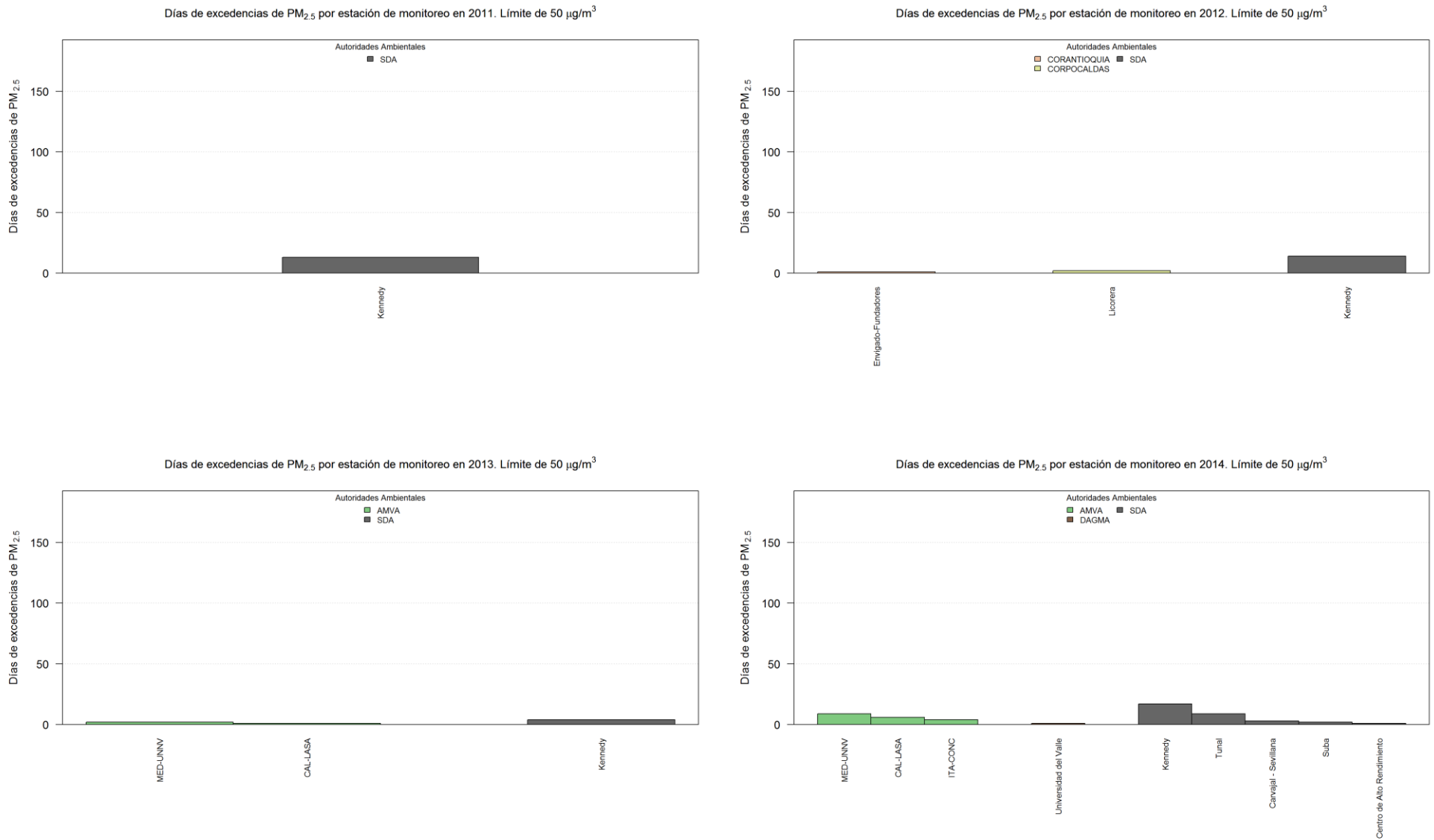
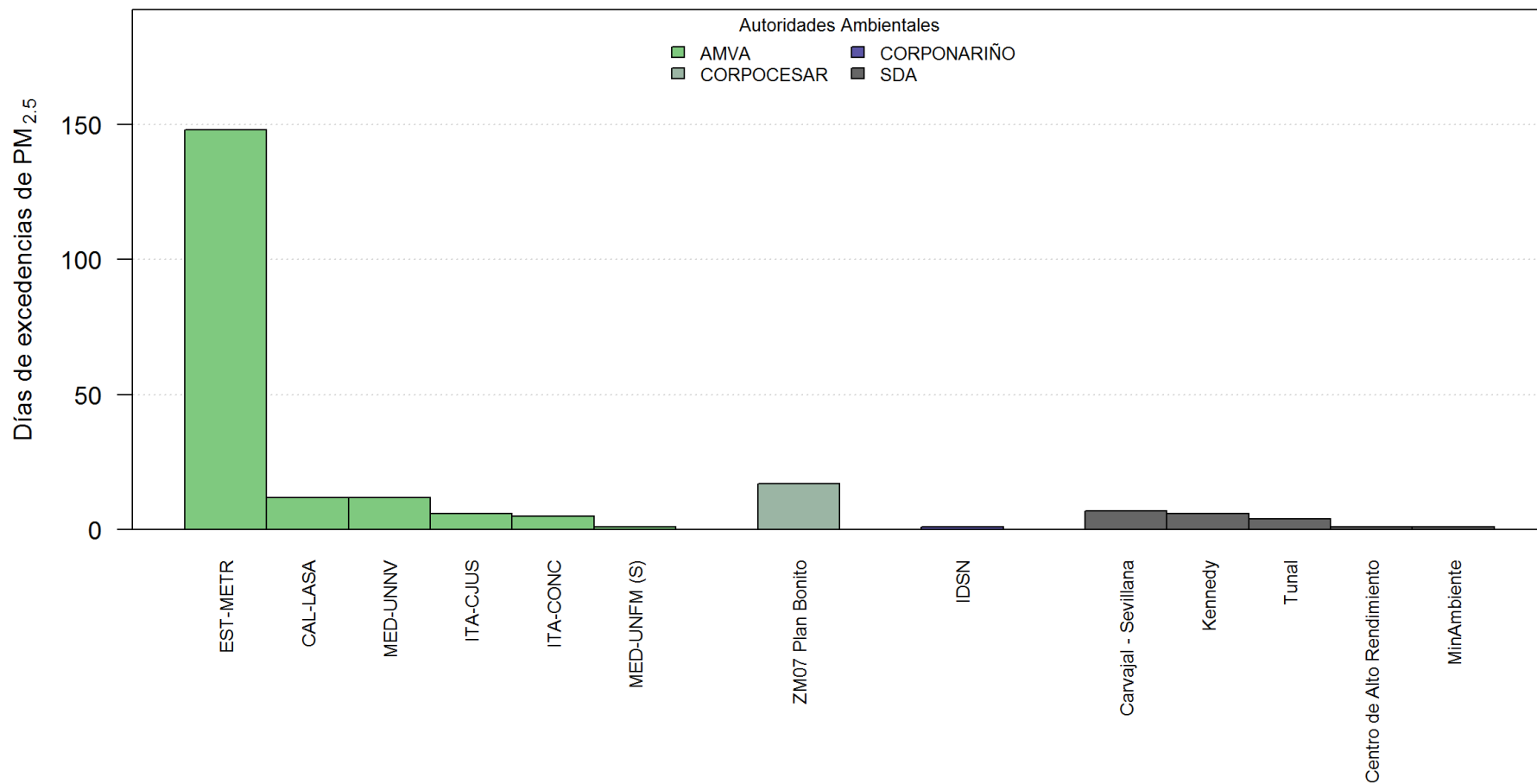
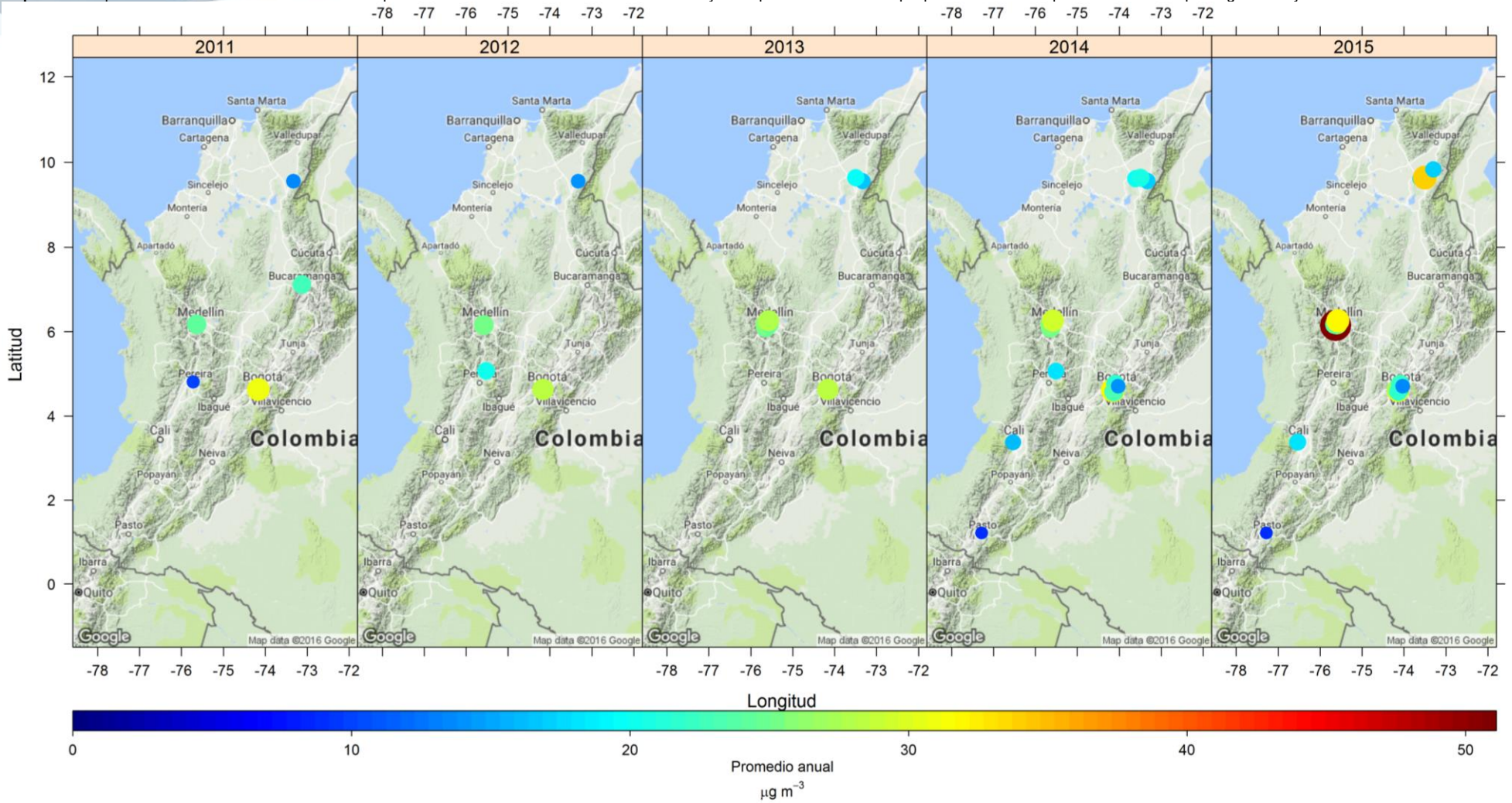


Figura 6-24. Días de excedencias de PM_{2.5} del límite máximo permisible de 50 µg/m³ en un tiempo de exposición diario en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%.

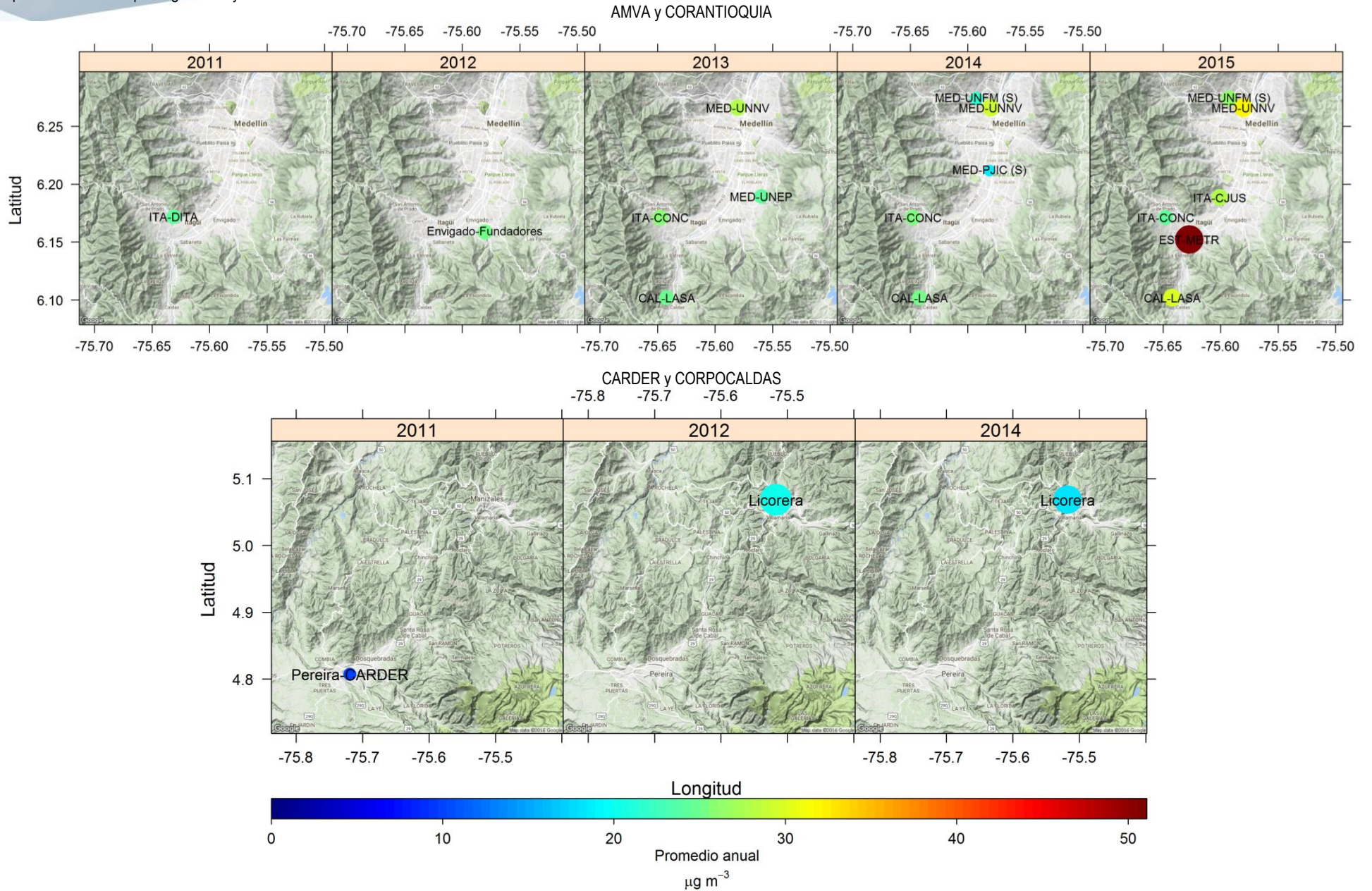
Días de excedencias de PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015. Límite de 50 µg/m³



Mapa 6-10. Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} entre los años 2011 y 2015 para las estaciones que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.



Mapa 6-11. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} para las estaciones de los SVCA de AMVA y CORANTIOQUIA (arriba, 2011 a 2015) y CARDER y CORPOCALDAS (abajo; 2011, 2012 y 2014) que tienen una representatividad temporal igual o mayor a 75%.



Mapa 6-12. Concentraciones promedio anuales de PM_{2.5} entre 2011 y 2015 para las estaciones de la Zona Minera del Cesar (arriba) y de la ciudad de Bogotá (abajo) que tienen una representatividad temporal igual o mayor a 75%

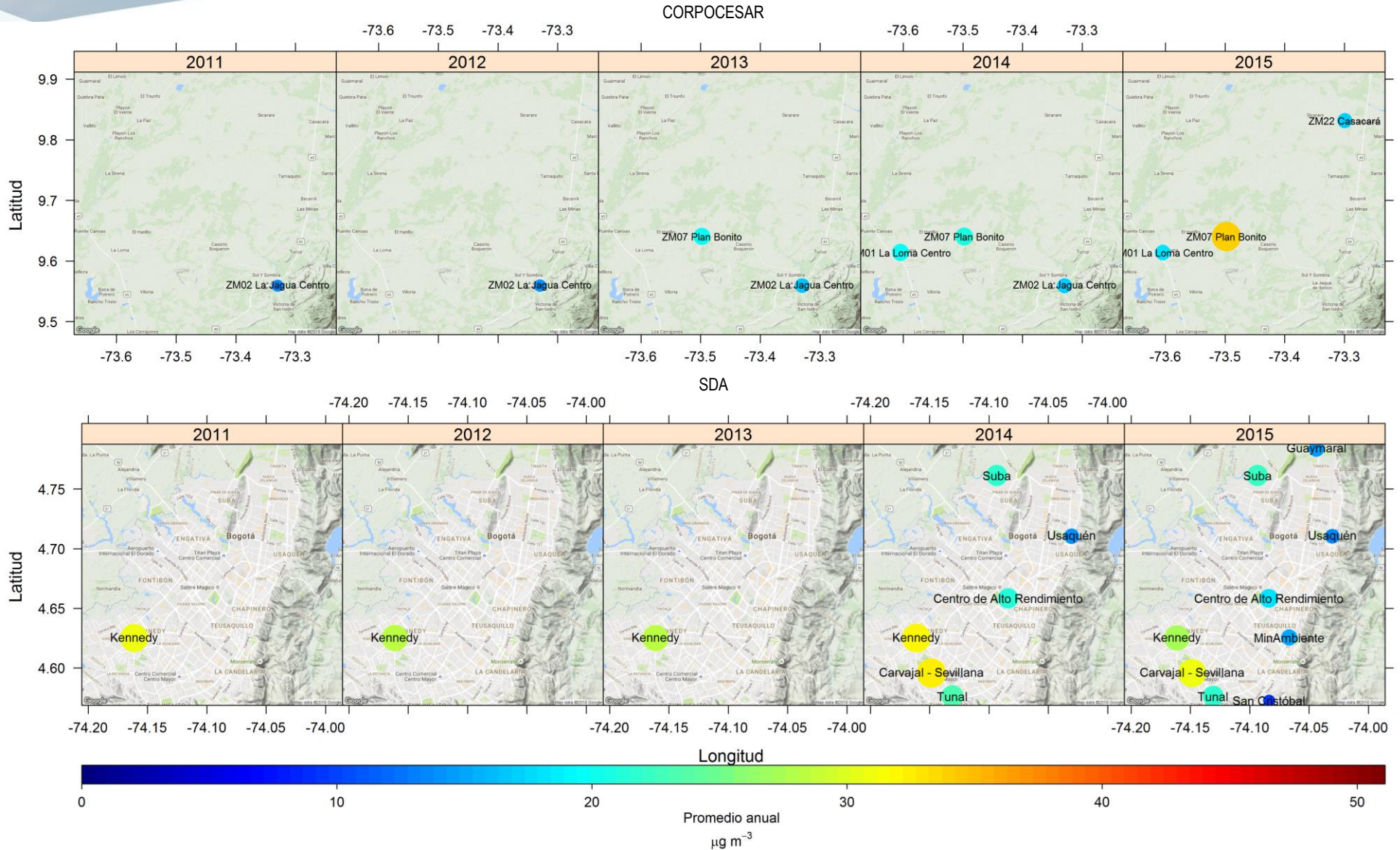
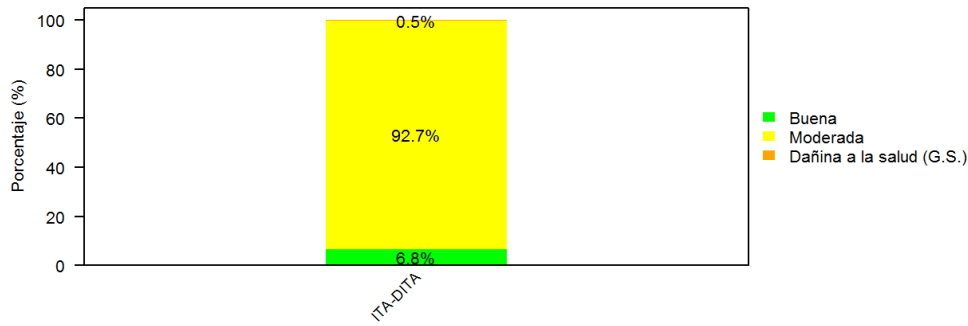
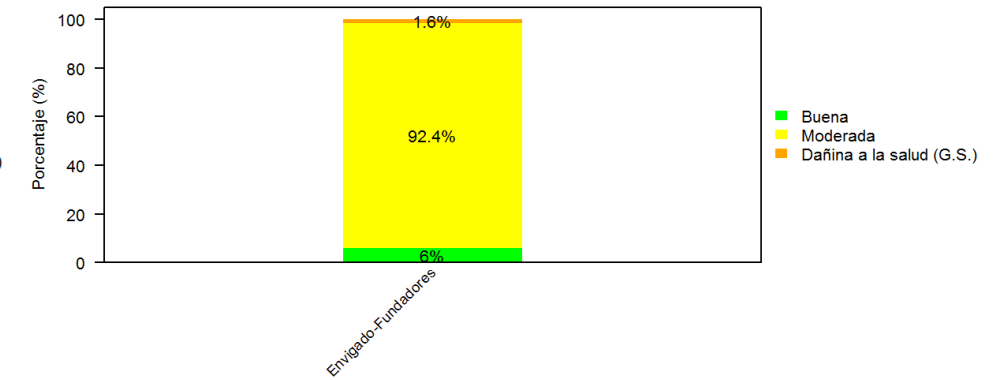


Figura 6-25. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM_{2.5} para los SCVA del Valle de Aburrá, correspondientes a AMVA en 2011, 2013, 2014 y 2015, y a CORANTIOQUIA en 2012. No hay estaciones de AMVA en 2012 con representatividad temporal de PM_{2.5} igual o superior a 75%.

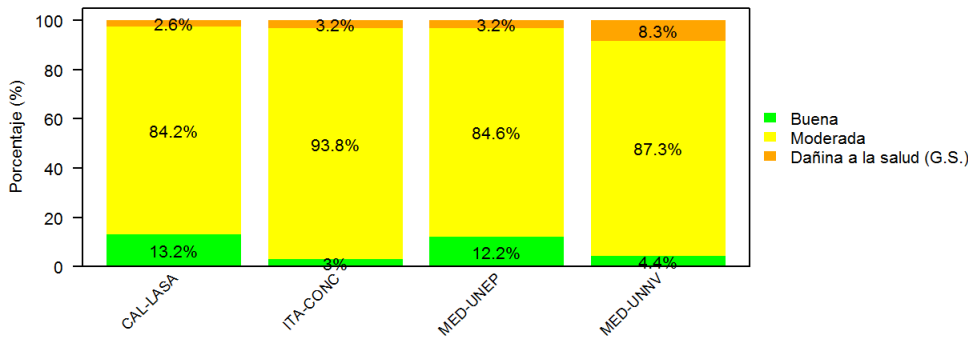
AMVA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2011. 24h



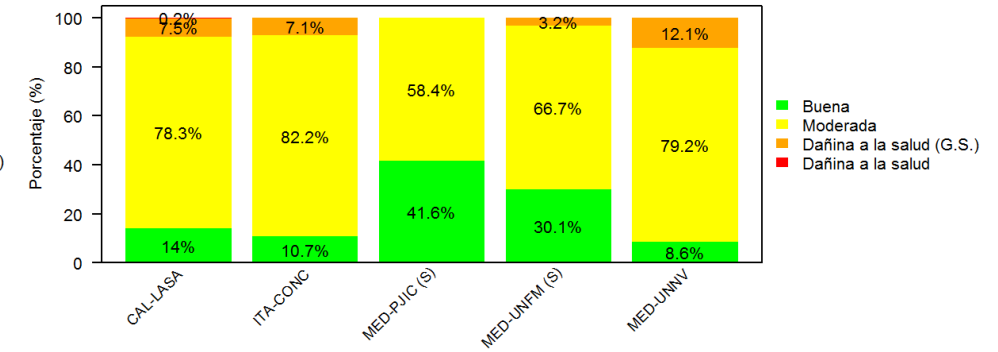
CORANTIOQUIA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2012. 24h



AMVA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2013. 24h



AMVA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2014. 24h



AMVA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015. 24h

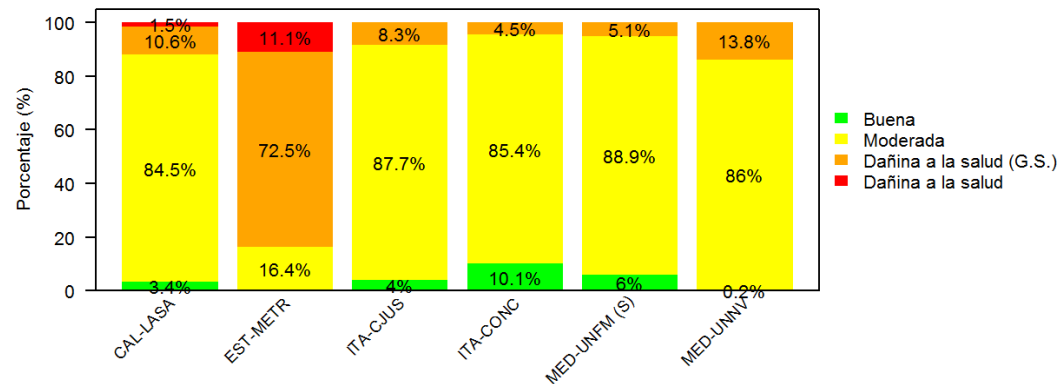
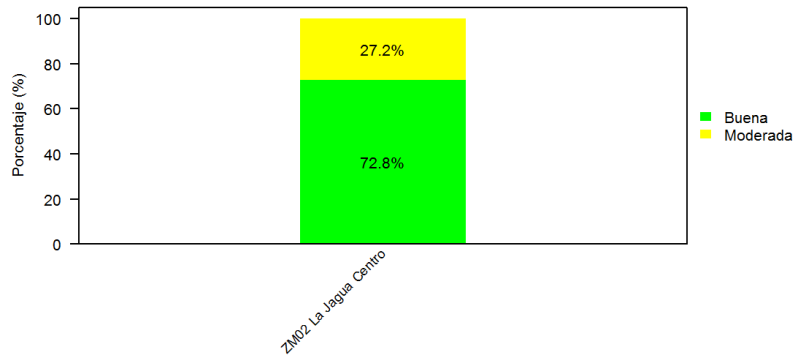
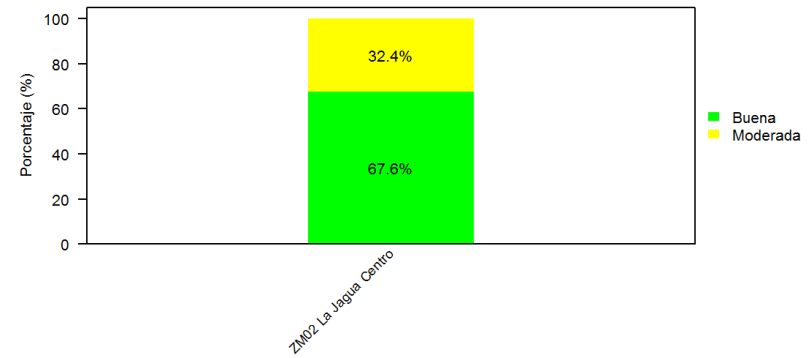


Figura 6-26. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM_{2.5} para el SVCA de la Zona Minera del Departamento del Cesar (CORPOCESAR) entre 2011 y 2015.

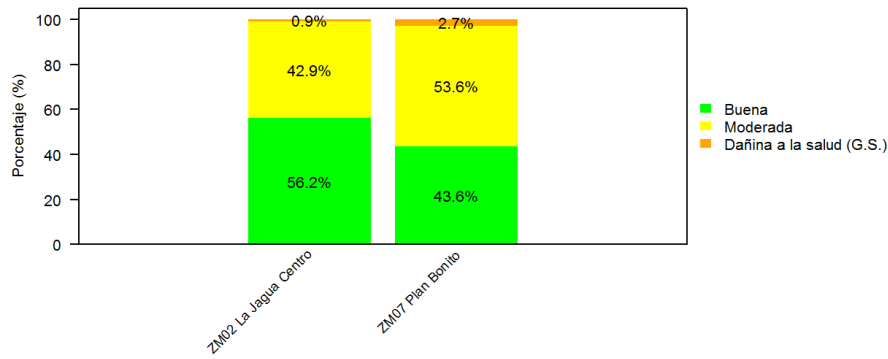
CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2011. 24h



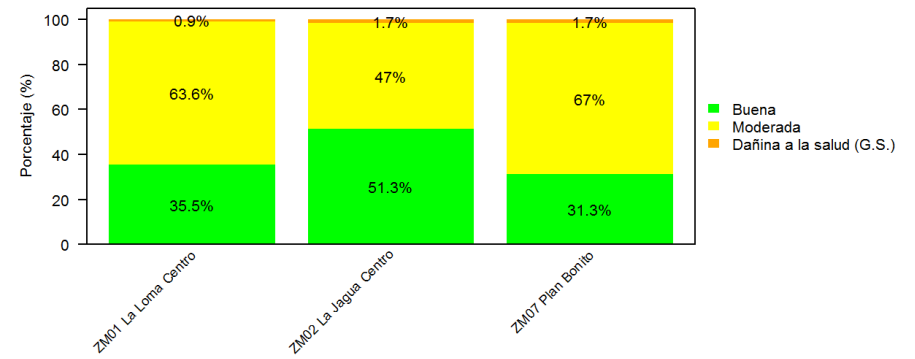
CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2012. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2013. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2014. 24h



CORPOCESAR. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015. 24h

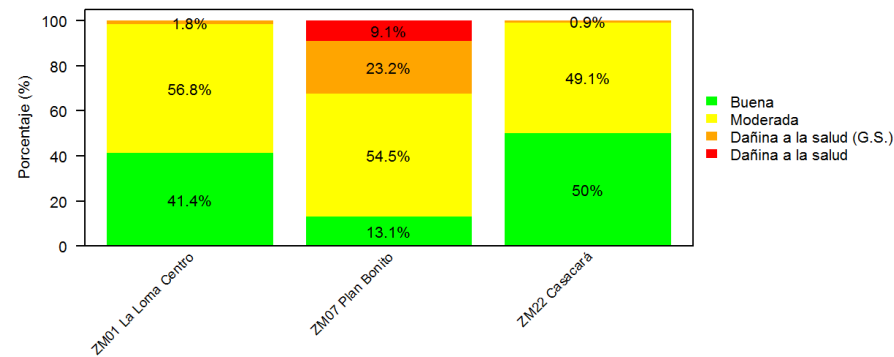


Figura 6-27. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM_{2.5} para el SVCA de la ciudad de Bogotá (SDA) entre 2011 y 2015.

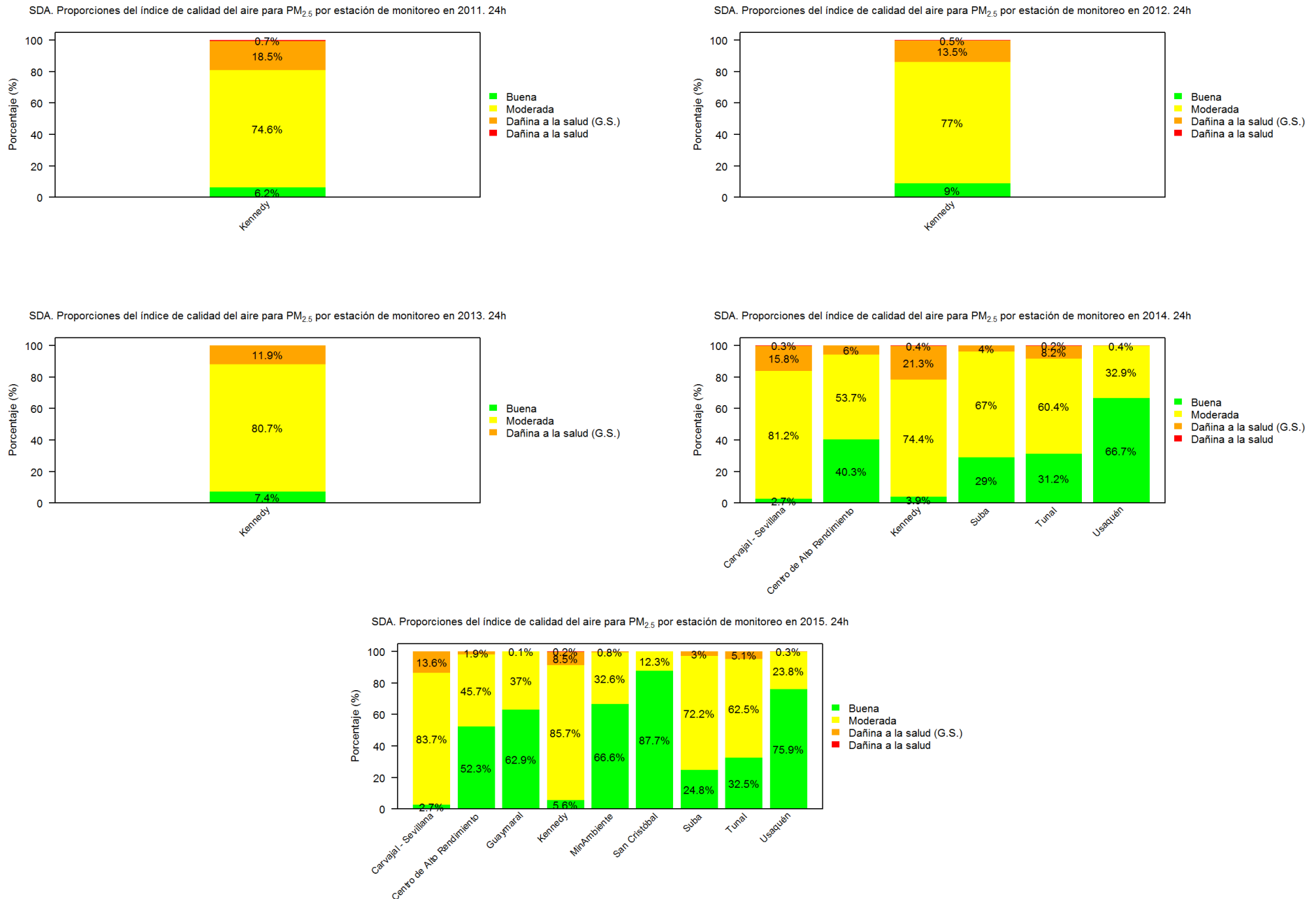
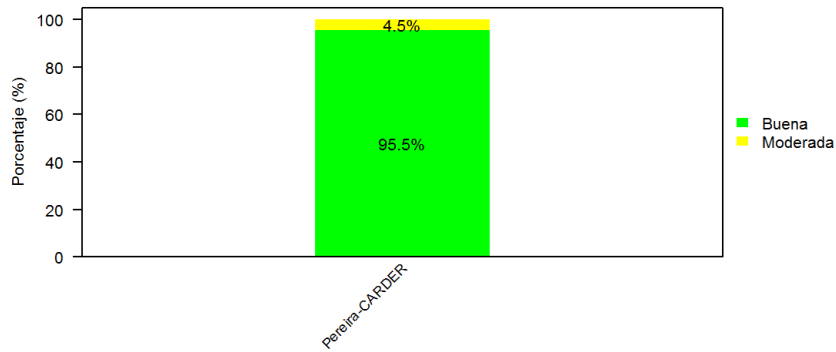
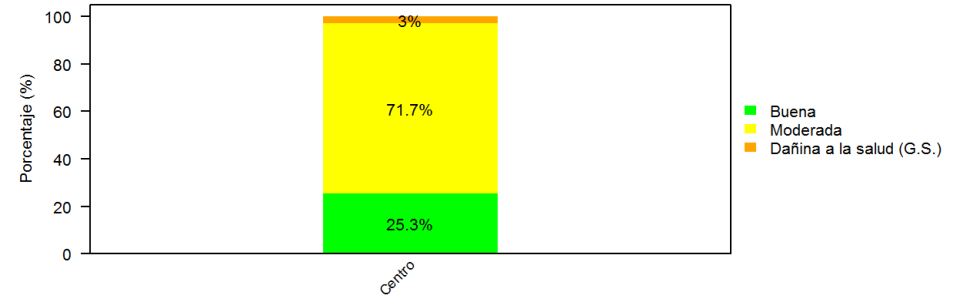


Figura 6-28. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM_{2.5} para los SVCA de la ciudad de Pereira (CARDER, 2011), Bucaramanga (CDBM, 2011), Manizales (CORPOCALDAS, 2012 y 2014) y de Pasto (CORPONARIÑO, 2014 y 2015).

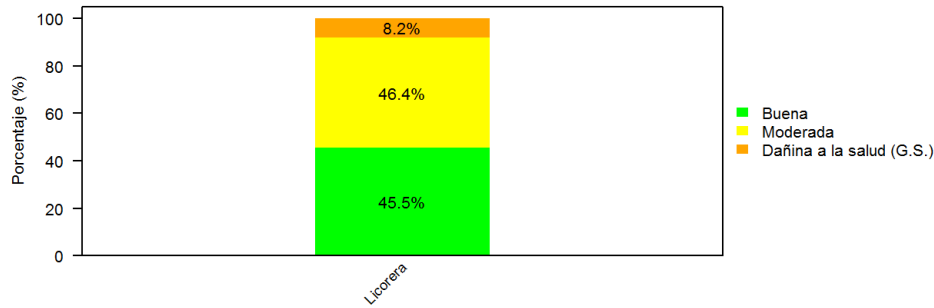
CARDER. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2011. 24h



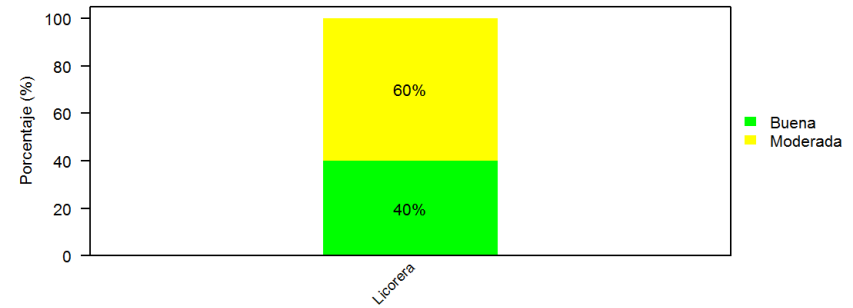
CDBM. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2011. 24h



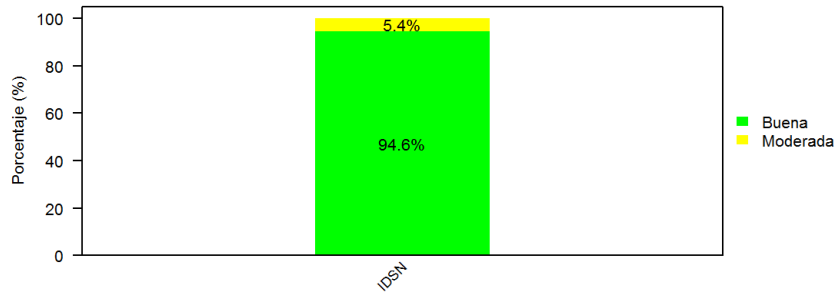
CORPOCALDAS. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2012. 24h



CORPOCALDAS. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2014. 24h



CORPONARIÑO. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2014. 24h



CORPONARIÑO. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015. 24h

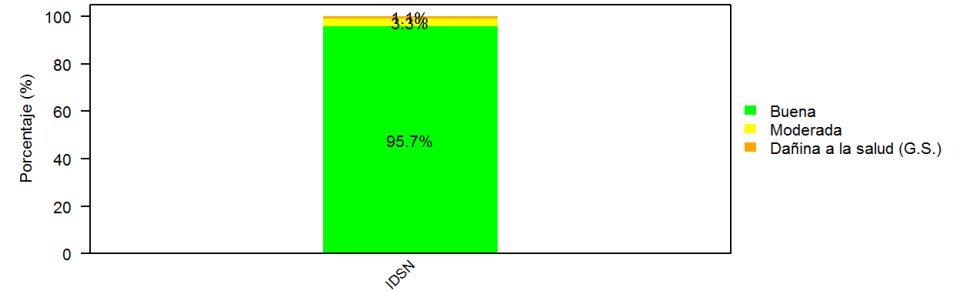
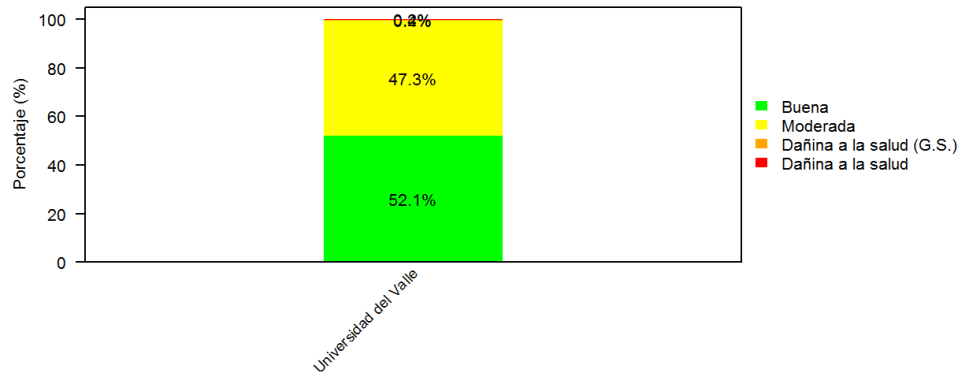
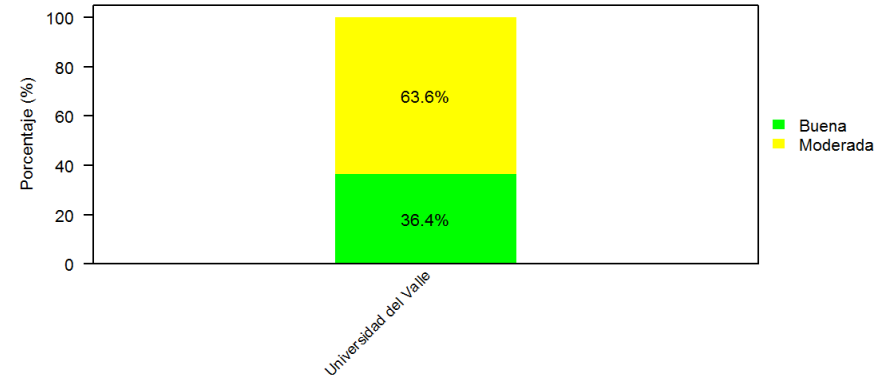


Figura 6-29. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del aire (ICA) de PM_{2.5} para el SVCA de la ciudad de Cali (DAGMA, 2014 y 2015).

DAGMA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2014. 24h



DAGMA. Proporciones del índice de calidad del aire para PM_{2.5} por estación de monitoreo en 2015. 24h



6.4. Ozono (O₃)

De acuerdo con la Resolución 610 de 2010, los límites máximos permisibles de O₃ son 120 µg/m³ y 80 µg/m³ en tiempos de exposición de 1 hora y 8 horas, respectivamente. Al igual que el monóxido de carbono (CO), para este contaminante no existe un límite anual y, por tanto, la evaluación del comportamiento de los promedios anuales carece de un valor de comparación. Este contaminante fue monitoreado en las siguientes regiones:

- Bogotá (SDA)
- Bucaramanga (CDBM)
- Cali – Palmira – Yumbo (CVC y DAGMA)
- Cauca (Guachene, Miranda, Santander – CRC)
- Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA)

En estas jurisdicciones se cuenta con equipos automáticos que permiten obtener promedios horarios y móviles de 8 horas. Sin embargo, sólo para AMVA, CDBM, DAGMA y SDA se cuentan con series anuales cuya representatividad temporal cumple con el criterio de mínimo 75% de datos válidos durante el respectivo año de estudio.

Es importante destacar que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció como valor guía 100 µg/m³ en una media de ocho horas (Organización Mundial de la Salud, 2006) evidenciando que el límite colombiano de 80 µg/m³ es más estricto, lo cual conduce a un mayor número de excedencias. Este mismo tiempo de exposición fue considerado en el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA).

6.4.1. Excedencias de los límites máximos permisibles

La Figura 6-30 y la Figura 6-31 presentan el número de días de excedencias de O₃ en un tiempo de exposición de 8 horas (promedios móviles) para las estaciones de los SVCA de Colombia que monitorearon este contaminante entre 2011 y 2015 y que tienen una representatividad temporal igual o superior a 75%. Se destaca que para que un día en particular sea considerado como excedencia al menos una hora debe haber superado el respectivo límite máximo permisible.

En todos los cinco años estudiados, las estaciones de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA) han presentado excedencias, registrando un máximo de 65 en la estación Usaqué en el año 2015. Sin embargo, se registraron valores más altos para otros SVCA del país, destacándose las estaciones Pance y Universidad del Valle de la ciudad de Cali en el año 2015 con 243 y 207 días de excedencias, respectivamente. En el Valle de Aburrá se observaron excedencias en las estaciones Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) y Corporación Lasallista (CAL – LASA) en 2013, 2014 y 2015 con un número de días que oscila entre 102 (CAL – LASA, 2014) y 172 (ITA – CONC, 2015). Se observa adicionalmente que el número de días de excedencias de 2015 es, en general, mayor en comparación con años anteriores, sugiriendo un aumento gradual de contaminación por ozono en ciertas zonas de Bogotá y del Valle de Aburrá. Es posible que se hayan presentado incumplimientos normativos en otras regiones del país; sin embargo, la evaluación de este contaminante está sujeta a la disponibilidad de equipos automáticos.

Para el límite máximo permisible en un tiempo de exposición de 1 hora (120 µg/m³) se observa una tendencia similar a la ya discutida, tal como se evidencia en la Figura 6-33.

6.4.2. Tendencias entre 2011 y 2015

La Figura 6-32 presenta la evolución de los días de excedencias del límite de 8 horas entre 2011 y 2015 para los SVCA del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Bucaramanga y Bogotá; esta representación gráfica no se presenta para DAGMA debido a que sólo se cuenta con datos de 2015.

En el Valle de Aburrá se observa que las mayores excedencias se presentan en las estaciones Corporación Lasallista (CAL – LASA) y Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) donde el número de días con incumplimientos en 2015 es mayor que los registrados para 2013 y 2014. Una tendencia similar, aunque en menor magnitud, se observa para Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV) y Parque De Las Aguas (BAR – PDLA). Sin embargo, la tendencia es contraria para Universidad San Buenaventura (BEL – USBV) y Universidad de Medellín (MED – UDEM). Una tendencia similar se observa para un tiempo de exposición de 1 hora, Figura 6-35.

En la ciudad de Bucaramanga se observa que el número de días de excedencias en la estación Ciudadela aumentó en 2012 en comparación con 2011. Para la estación Centro no se cuenta con información suficiente para poder establecer una comparación histórica. La misma tendencia se observa para un tiempo de exposición de 1 hora, Figura 6-35.

En Bogotá se observa un descenso progresivo del número de días de excedencias para Las Ferias y Suba. En Usaquén, el número de días de excedencias de 2015 (65 días) aumentó notablemente en comparación con el año 2014 (11 días). En un tiempo de exposición de 1 hora, Figura 6-35, se observa que en 2014 no se evidenciaron días de excedencias para Suba. Esto indica que las concentraciones no están sujetas a presentar picos ya que se mantienen por debajo de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero son lo suficientemente altas para exceder el límite en un tiempo de exposición de 8 horas de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

6.4.3. Ubicación espacial de excedencias

El Mapa 6-13 es una representación espacial del número de días de excedencias para 8 horas de exposición en el Valle de Aburrá y en las ciudades de Bogotá, Bucaramanga y Cali entre los años 2011 y 2015. Inmediatamente se destaca el aumento del número de días de excedencias en el Valle de Aburrá a partir del año 2013 así como el alto número de incumplimientos en las dos estaciones de la Ciudad de Cali, discutidas previamente.

La representación espacial en mayor detalle para cada una de estas zonas se presenta en el Mapa 6-14. para Valle de Aburrá (AMVA) y Bogotá (SDA) y en el Mapa 6-15, para Bucaramanga (CDMB) y Cali (DAGMA). Para Bogotá se observa que las estaciones de su zona norte tienden a presentar mayores incumplimientos en comparación con la zona sur, lo cual establece un contraste con respecto a lo observado en el análisis del material particulado. Al ser un contaminante secundario, el ozono presenta tendencias espaciales distintas en comparación con sus equivalentes primarios.

6.4.4. Índice de Calidad del Aire.

Los resultados del cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA) para un tiempo de exposición de 8 horas muestran que, con respecto al ozono, la calidad del aire se mantiene predominantemente en la categoría “Buena” en las estaciones de los SVCA analizados, con una participación porcentual que, en general, se encuentra por encima de 96,9%; la única categoría adicional es “Moderada” de la cual se distribuye de la siguiente manera:

- **AMVA:** Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) con participación de 0,2% en 2013, de 0,4% en 2014 y 1% en 2015; Corporación Lasallista (CAL – LASA) con una participación de 0,1% en 2014 y 0,5% en

2015; Tanques Orfanato de Villahermosa (MED – VIHE) con participación de 0,1% en 2014; Universidad San Buenaventura (BEL – USBV) con participación de 0,1% en 2015. Los resultados muestran que para ITA – CONC la presencia de episodios con la categoría “Moderada” ha estado en aumento entre 2013 y 2015.

- **DAGMA:** Pance con una participación de 3,1% y Universidad del Valle con 1,4% en 2015. Estas dos estaciones presentaron el mayor número de excedencias y, por ende, la más alta participación de la categoría “Moderada”.
- **SDA:** Usaquén con una participación de 0,1% en 2011, 2014 y 2015.

La categoría “Moderada” de ozono implica que las personas inusualmente sensibles pueden experimentar síntomas respiratorios, por lo cual se recomienda reducir las actividades físicas exteriores prolongadas o intensas.

Desde el punto de vista del cálculo del ICA, la situación en términos de contaminación atmosférica por ozono parece ser menos preocupante en comparación con el análisis del número de días de excedencias. La diferencia se debe a que, como se mencionó previamente, el límite máximo permisible de ozono en un tiempo de exposición de 8 horas de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es más estricto que el valor guía de la Organización Mundial de la Salud de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$; así como del umbral de concentración de $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (o 59 ppb) que separa la categoría de ICA “Buena” de la “Moderada”.

En cuanto al tiempo de exposición de 1 hora, el ICA de O_3 sólo se calcula a partir de la categoría “Dañina a la salud para grupos sensibles”, para la cual se encontraron los episodios descritos en la Tabla 6-2. Esta categoría implica incremento de la probabilidad de ocurrencia de síntomas y molestias respiratorias en niños activos, adultos y personas con enfermedades respiratorias, como asma.

Tabla 6-2. Lista de episodios de contaminación por ozono en los cuales la categoría de ICA correspondió a “Dañina a la salud para grupos sensibles” en un tiempo de exposición de 1 hora.

Autoridad Ambiental	Estación	Fecha	Valor de ICA
AMVA	BEL - USBV	29/10/2014 20:00	146
		05/11/2014 11:00	109

Figura 6-30. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2014. El límite máximo permisible es 80 µg/m³ en un tiempo de exposición de 8 horas.

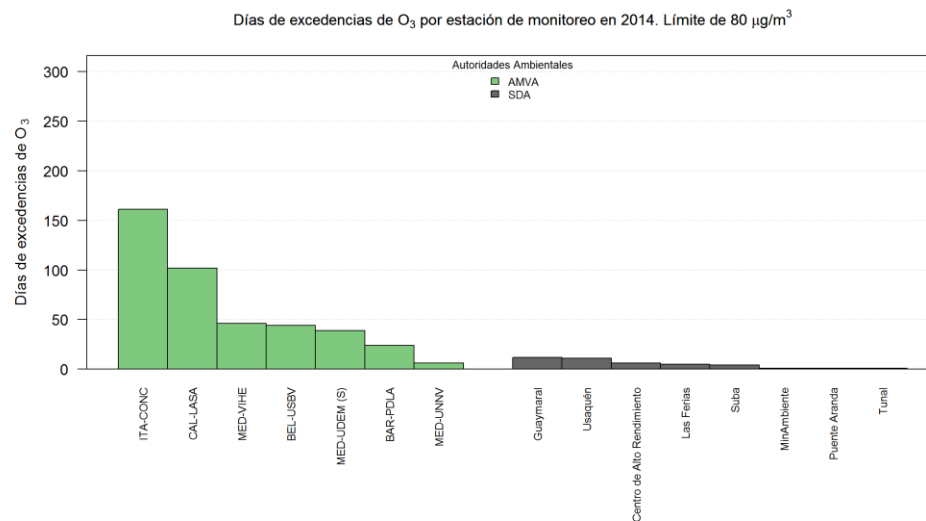
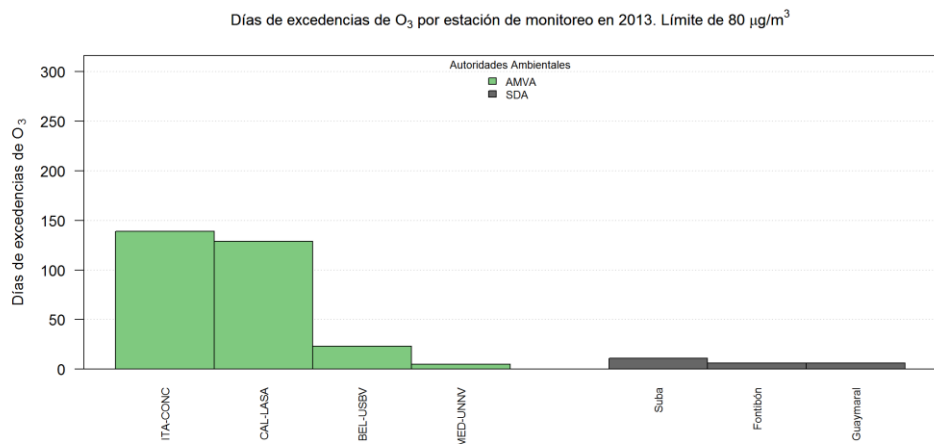
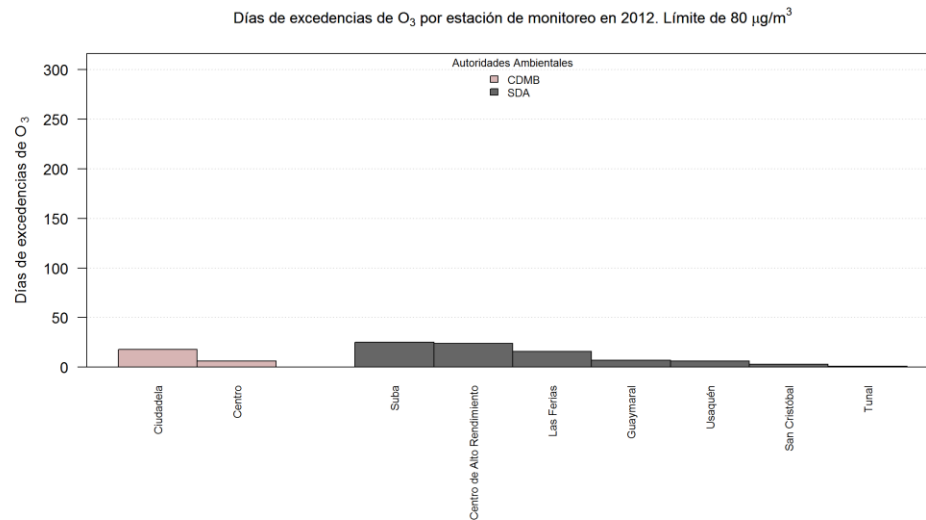
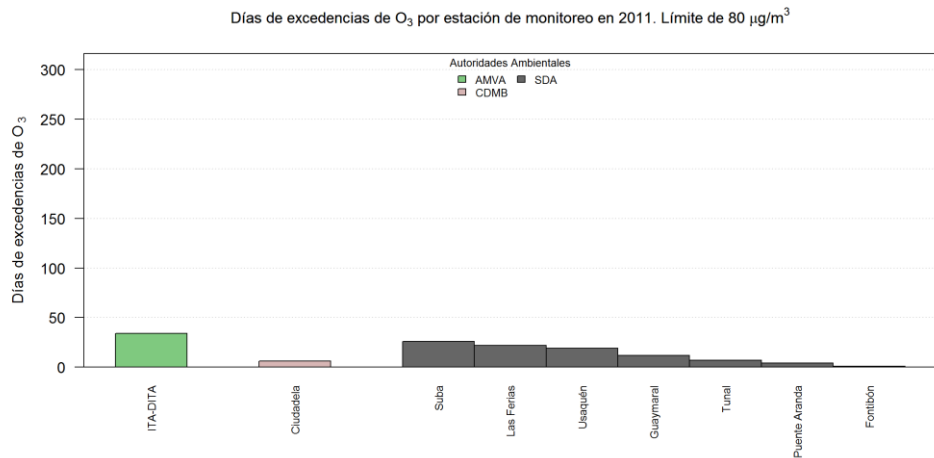


Figura 6-31. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% en 2015. El límite máximo permisible es 80 µg/m³ en un tiempo de exposición de 8 horas.

Días de excedencias de O₃ por estación de monitoreo en 2015. Límite de 80 µg/m³

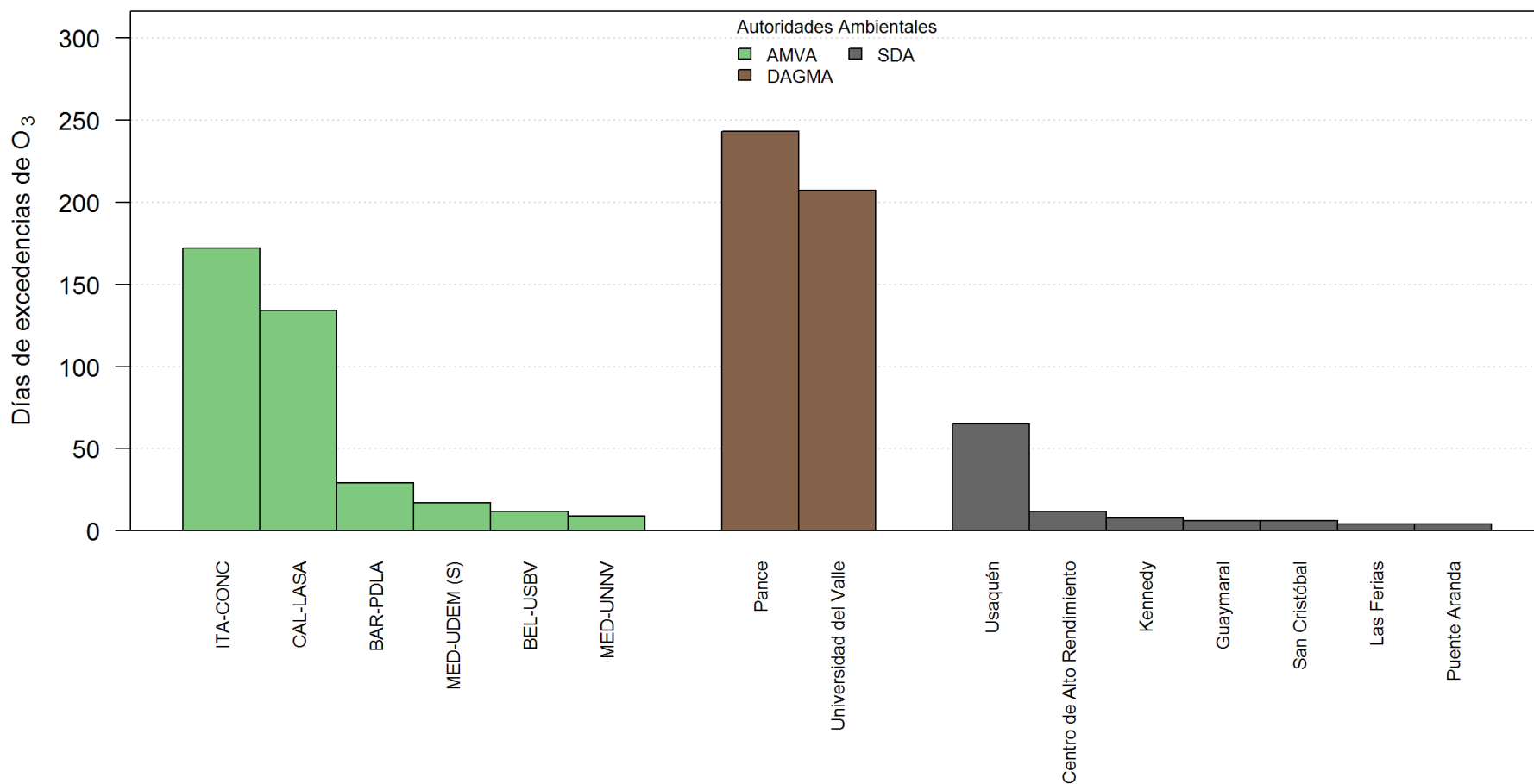


Figura 6-32. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75% entre 2011 y 2015. El límite máximo permisible es 80 µg/m³ en un tiempo de exposición de 8 horas.

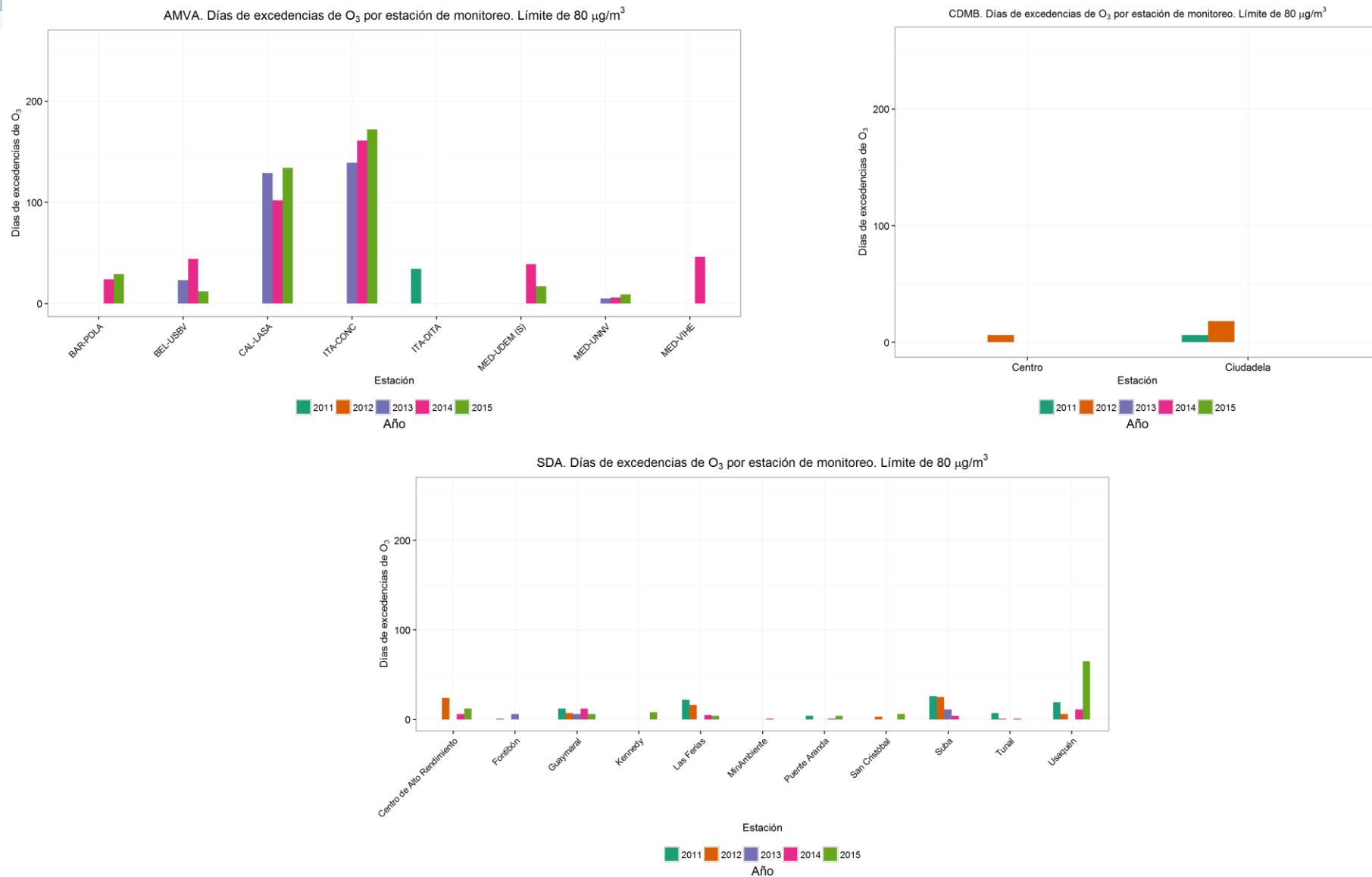


Figura 6-33. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2014. Límite de 120 µg/m³ en un tiempo de exposición horario.

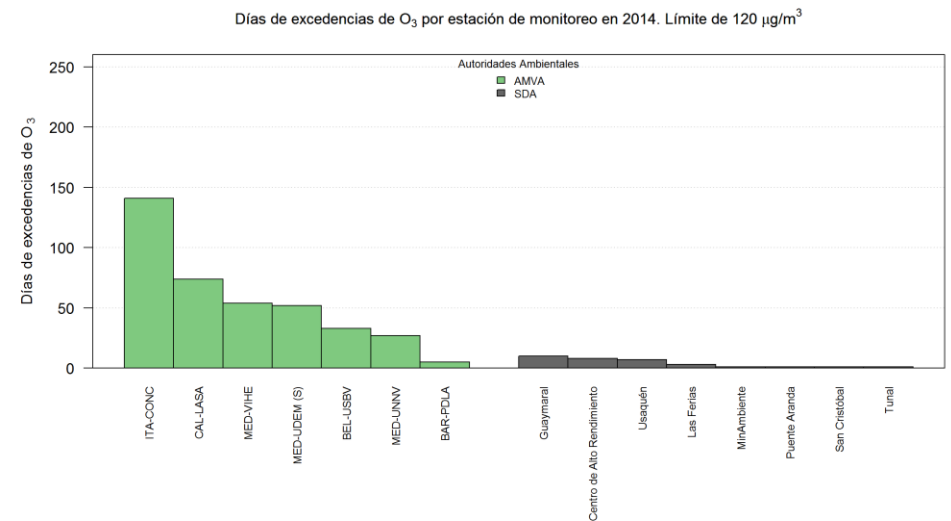
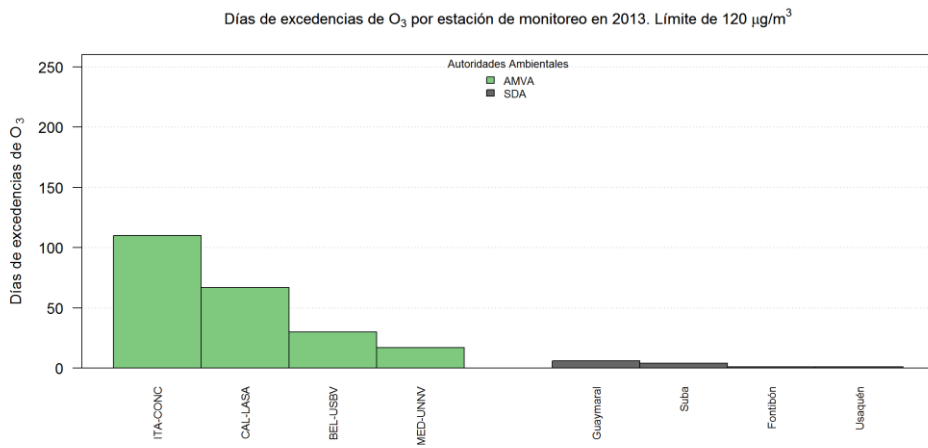
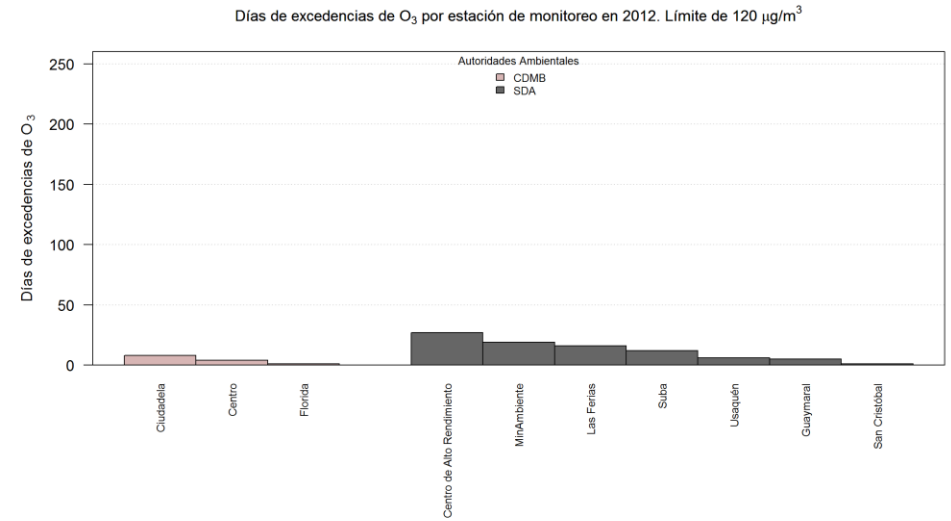
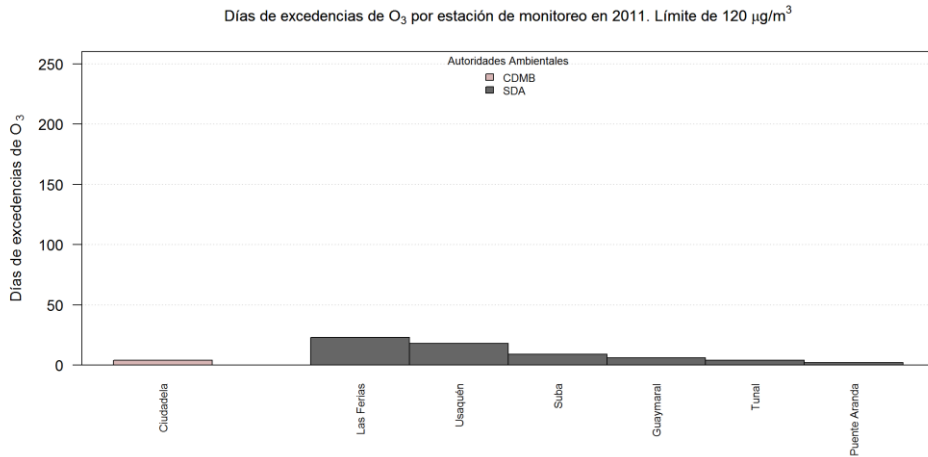


Figura 6-34. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% en 2015. Límite de 120 µg/m³ en un tiempo de exposición horario.

Días de excedencias de O₃ por estación de monitoreo en 2015. Límite de 120 µg/m³

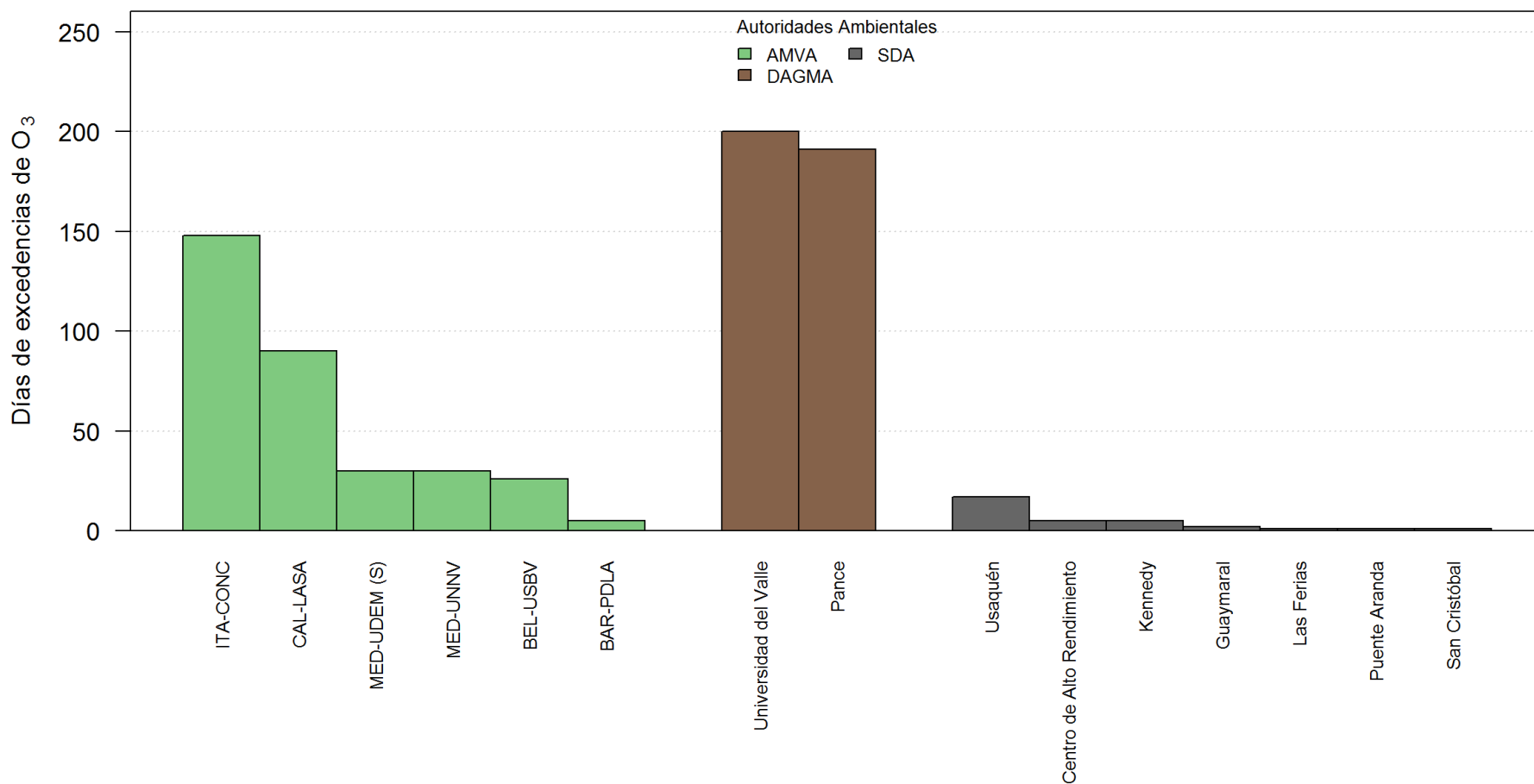
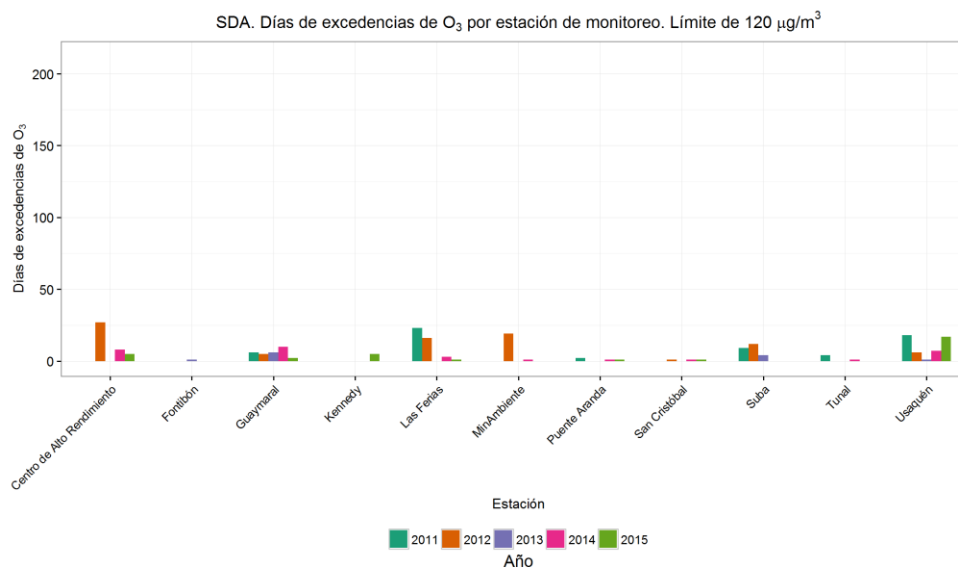
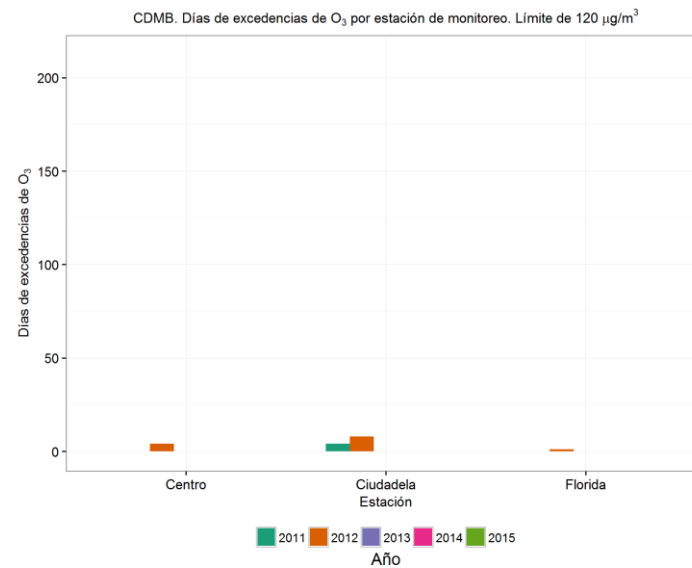
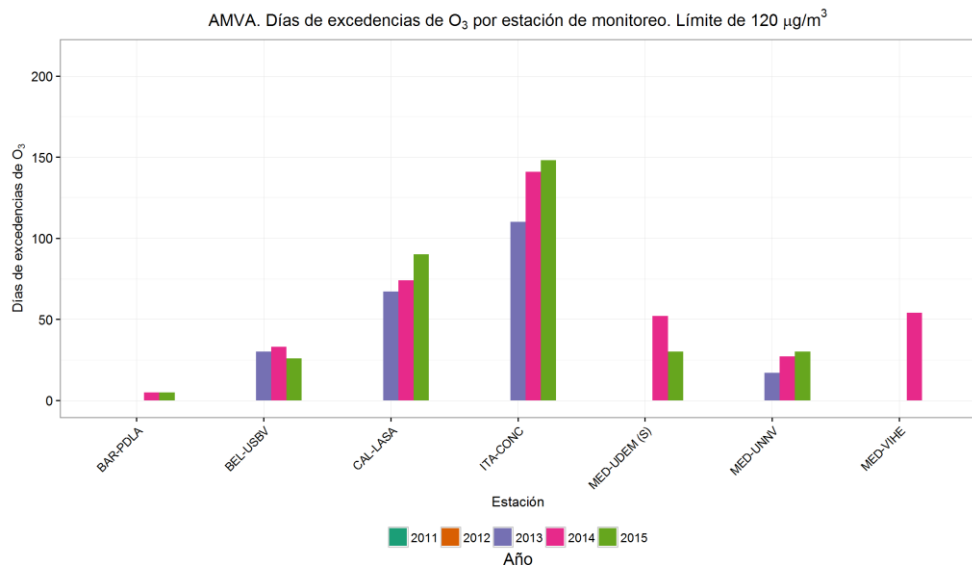
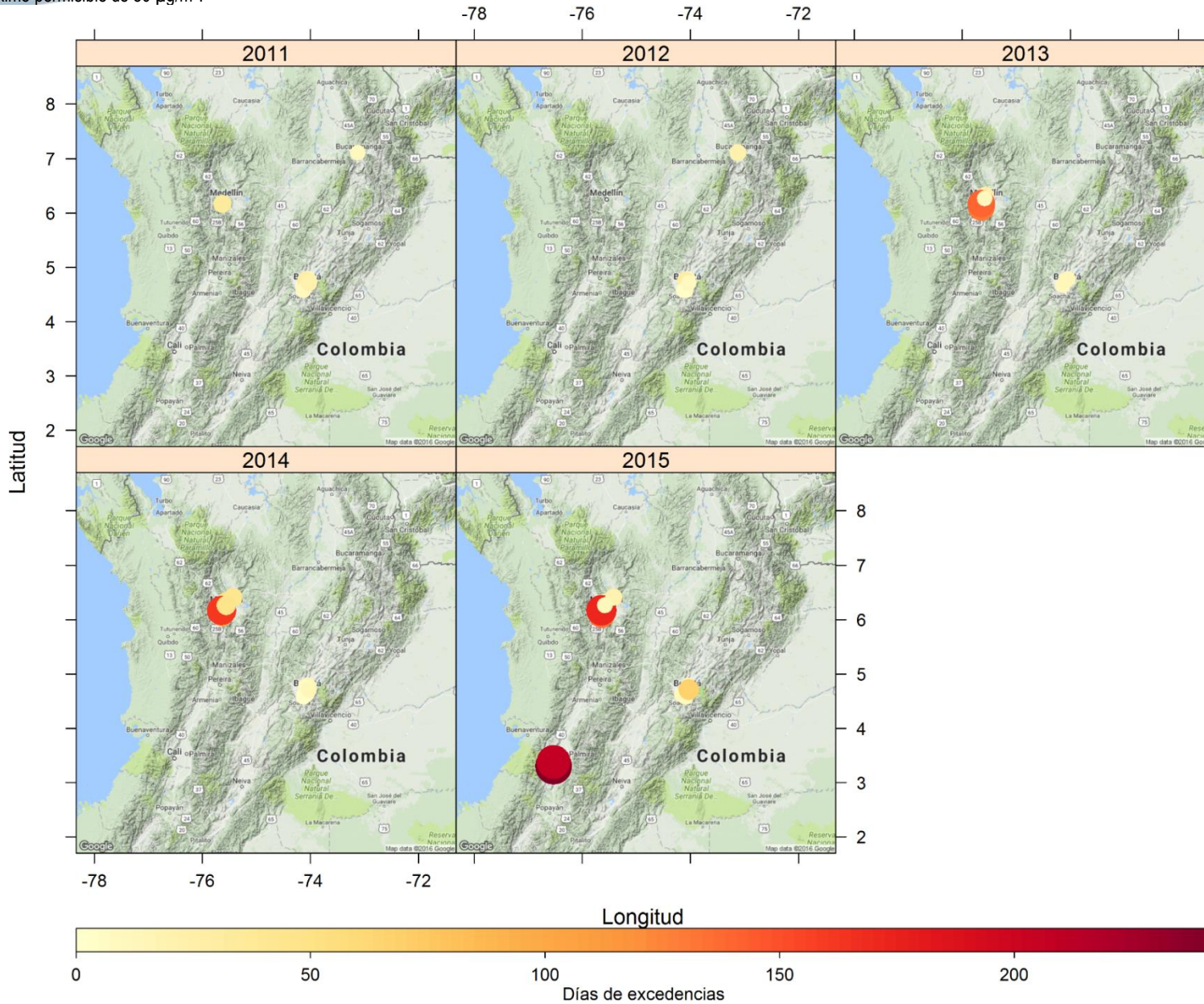


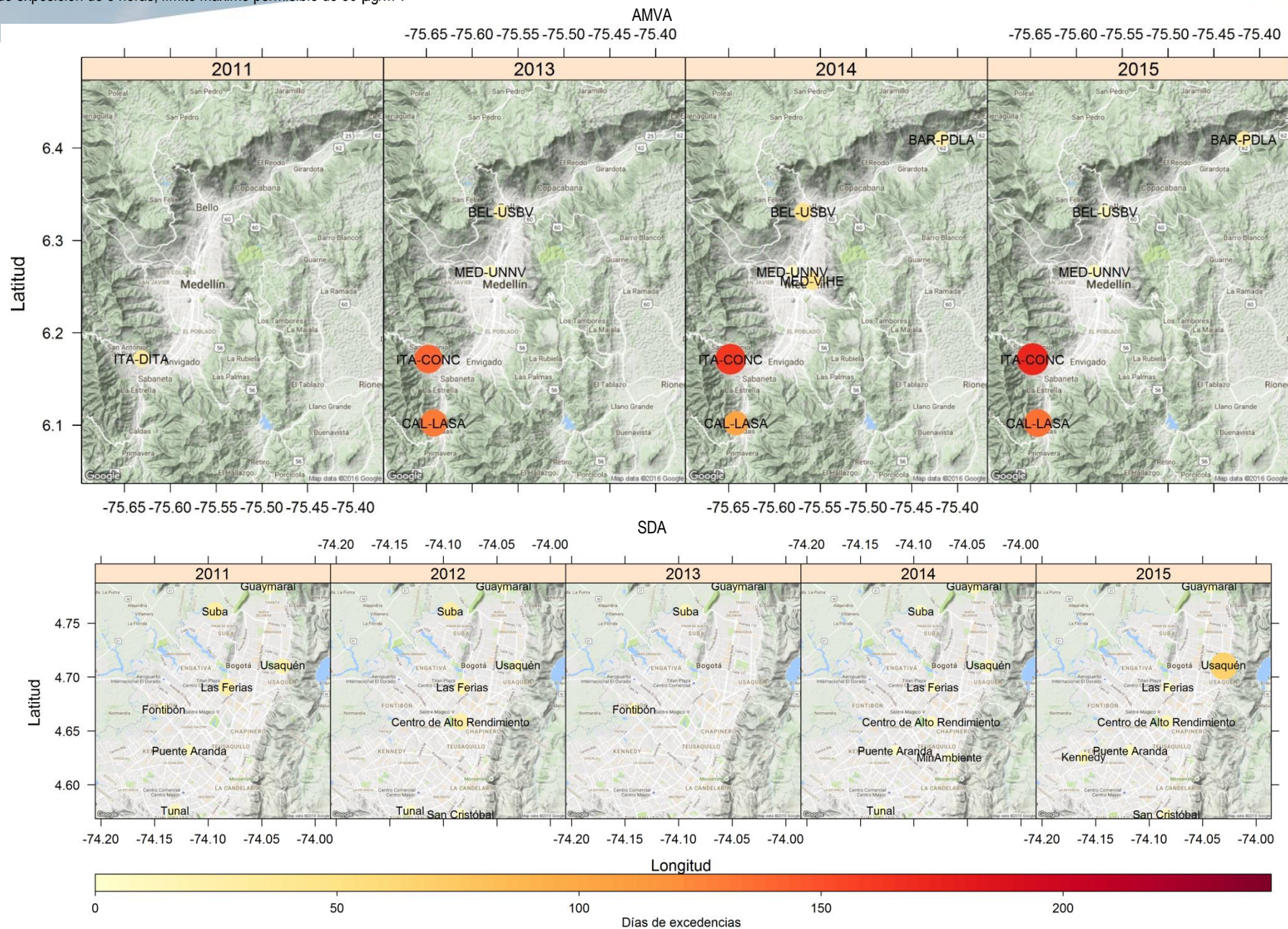
Figura 6-35. Días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75% entre 2011 y 2015. Límite de 120 µg/m³ en un tiempo de exposición horario.



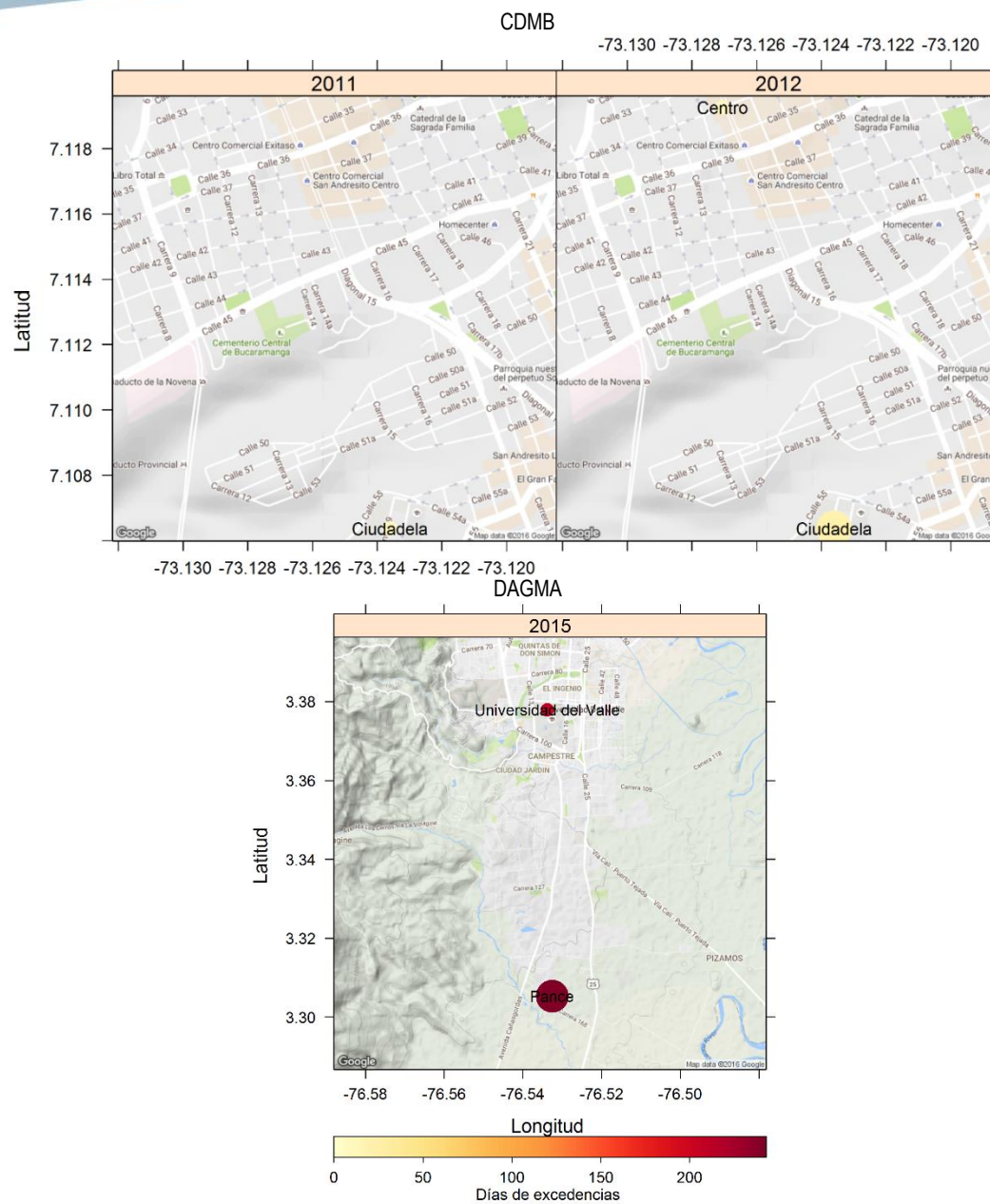
Mapa 6-13. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA, CDMB, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75% entre 2011 y 2015. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m³.



Mapa 6-14. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de los SVCA de AMVA (arriba; 2011, 2013, 2014 y 2015) y SDA (abajo; 2011 a 2015) que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m³.



Mapa 6-15. Número de días de excedencias de O₃ para las estaciones de CDMB (2011 y 2012) y DAGMA (2015) que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%. Tiempo de exposición de 8 horas, límite máximo permisible de 80 µg/m³.



6.5. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

La Resolución 610 de 2010 contempla tres límites máximos permisibles para dióxido de nitrógeno, los cuales son 100 µg/m³, 150 µg/m³ y 200 µg/m³ para tiempos de exposición anual, diario y horario, respectivamente; este último solamente puede ser evaluado con equipos automáticos. Siete SVCA monitorearon esta variable en el periodo estudiado los cuales corresponden a las regiones del Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA), la jurisdicción de la CAR, la ciudad de Bucaramanga (CDBM), Cali – Palmira – Yumbo (CVC y DAGMA) y Bogotá (SDA). Para la CAR no es posible la evaluación del límite horario dado que los datos base son diarios. Entre estos SVCA, ninguna serie anual de la CVC cumplió con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.

6.5.1. Concentraciones promedio anuales

La Figura 6-36 y la Figura 6-37 presentan la distribución de los promedios anuales de NO₂ de las estaciones de los SVCA mencionados que cumplieron con el criterio de representatividad temporal. Ningún promedio excedió el límite máximo permisible de 100 µg/m³ y con excepción de Carvajal – Sevillana (SDA), todos registraron magnitudes incluso inferiores al 50% del valor normativo. Para todos los años estudiados se cuenta con información representativa de CAR y de la SDA, entre 2013 y 2015 para AMVA, en 2011 y 2012 para CDBM y CORANTIOQUIA y en 2015 para DAGMA.

6.5.2. Tendencias entre 2011 y 2015

Si bien ninguna estación presentó excedencias del límite máximo permisible anual, es posible realizar la comparación histórica de los respectivos promedios e identificar tendencias en los cinco años analizados. La Figura 6-38 muestra la evolución de estos promedios para los SVCA de AMVA, CDBM y CORANTIOQUIA, y la Figura 6-39 para CAR y SDA. No se presenta una representación gráfica para DAGMA debido a que sólo se dispone de información representativa para 2015, imposibilitando la comparación interanual.

Para el Valle de Aburrá se observa un incremento progresivo de las concentraciones de este contaminante entre los años 2013 y 2015 para las estaciones Casa de Justicia Itagüí (ITA – CJUS) y Estación Móvil 2 – UNAL (MED – UNNV), y entre 2014 y 2015 para Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (MED – PJIC) y Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM). Estas tendencias son contrarias a la encontrada para Universidad San Buenaventura (BEL – USBV) donde se redujo la concentración entre 2013 y 2015. En el caso de la estación Envigado – Fundadores de CORANTIOQUIA, se observó una disminución del promedio anual entre 2011 y 2012; no se cuenta con información representativa entre 2013 y 2015.

En la ciudad de Bucaramanga sólo es posible realizar la comparación interanual en los años 2011 y 2012 para las estaciones Centro y Ciudadela, en las cuales se observó una disminución de los promedios anuales que sugiere un mejor estado de la calidad del aire.

En la jurisdicción de la CAR se observa una diferencia considerable entre los niveles de los años 2011 y 2012, y los correspondientes a los años 2013 a 2015 donde se observa una reducción considerable. En las estaciones donde hay información representativa, las concentraciones de 2015 son menores o iguales a las correspondientes a 2013 y 2014, evidenciando una mejora progresiva de la calidad del aire en las áreas de influencia de estas estaciones.

Las tendencias en Bogotá (SDA) indican una reducción progresiva de las concentraciones para Puente Aranda (entre 2013 y 2015) y Tunal (entre 2011 y 2015). Por el contrario, los promedios anuales aumentaron para Guaymaral (entre 2014 y 2015) y en Suba (entre 2012 y 2014). Para Centro de Alto Rendimiento, Kennedy y Las Ferias no hay una tendencia clara de aumento o de disminución. En Carvajal – Sevillana

solamente se dispone de información para el año 2015 y, por tanto, no es posible realizar una comparación interanual.

6.5.3. Comparación con las tendencias en el periodo 2007 – 2010

En esta sección se presenta la comparación de las concentraciones anuales de PM₁₀ en 2011 – 2014 con respecto al periodo 2007 – 2010.

- **AMVA:** en ambos periodos se dispone información de las estaciones Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (MED – PJIC) y Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM) en las cuales se observa que los promedios anuales no variaron de forma significativa.
- **CAR:** en general las concentraciones presentaron un descenso, que en el mejor de los casos es de 50%. Esta reducción es aún más pronunciada si se consideran los años 2013 a 2015.
- **CDMB:** no se observan variaciones significativas para las estaciones Centro y Ciudadela.
- **CORANTIOQUIA:** los niveles de este contaminante en la estación Envigado – Fundadores se mantuvieron relativamente constantes para los años 2007, 2009, 2010, 2011 y 2012.
- **SDA:** las concentraciones se mantuvieron relativamente constantes para Carvajal – Sevillana (antes Carvajal – Sony), Guaymaral (antes Guaymaral – Escuela), Las Ferias (antes Las Ferias - Carrefour) y Suba, y se redujeron para las estaciones Centro de Alto Rendimiento (antes Parque Simón Bolívar), Puente Aranda, Kennedy y Tunal; la reducción fue más leve en estas dos últimas estaciones.

6.5.4. Excedencias del límite máximo permisible diario

El límite máximo permisible diario de 150 µg/m³ no fue excedido por ninguna estación entre los años 2011 y 2015. Sin embargo, el límite máximo permisible horario de 200 µg/m³ fue excedido por las estaciones Universidad Nacional de Colombia M2 (MED – UNFM) en 2014 (dos excedencias) y 2015 (una excedencia), y por Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (MED – PJIC) en 2015 con una excedencia. Para este último límite es importante tener en cuenta que estas excedencias representan a lo sumo el 0,02% de la totalidad de datos válidos. Por tanto, los niveles de este contaminante son menos preocupantes si se tienen en cuenta los correspondientes al material particulado, especialmente PM_{2.5}.

6.5.5. Mapas de las concentraciones anuales

El Mapa 6-16 muestra la distribución espacial de las concentraciones promedio anuales de dióxido de nitrógeno para los cinco SVCA analizados. Se observa que las concentraciones más altas se mantienen en niveles similares a 50 µg/m³, llegando hasta un máximo de 53 µg/m³ en la estación Carvajal – Sevillana en el año 2015.

Representaciones más detalladas se presentan en el Mapa 6-17 para los SVCA del Valle de Aburrá (AMVA y CORANTIOQUIA) y Bucaramanga (CDMB) y en el Mapa 6-18 para la jurisdicción de la CAR y Bogotá (SDA).

6.5.6. Índice de Calidad del Aire

De acuerdo con el Manual de Operación del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010), el Índice de Calidad del Aire para NO₂ solamente puede ser calculado con concentraciones horarias iguales o superiores a los 650 ppb o 1222 µg/m³. Entre las series anuales con representatividad temporal igual o superior a 75%, la máxima concentración horaria registrada fue 259 µg/m³ en la estación Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (MED – PJIC) de AMVA, lo cual evidencia la inviabilidad de calcular este indicador.

Figura 6-36. Concentraciones promedio anuales de NO₂ entre 2011 y 2014 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.

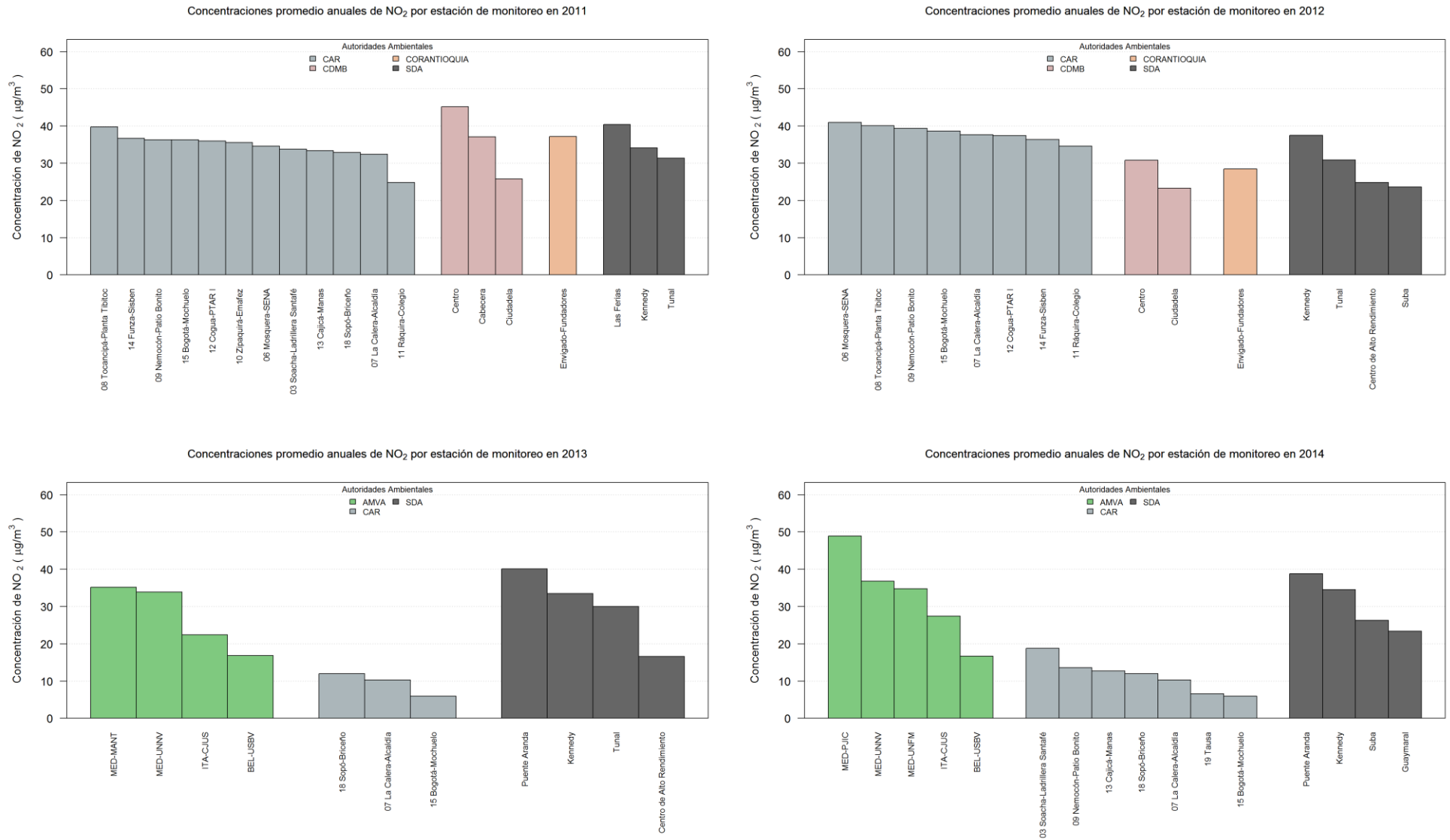


Figura 6-37. Concentraciones promedio anuales de NO₂ en 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o mayor a 75%.

Concentraciones promedio anuales de NO₂ por estación de monitoreo en 2015

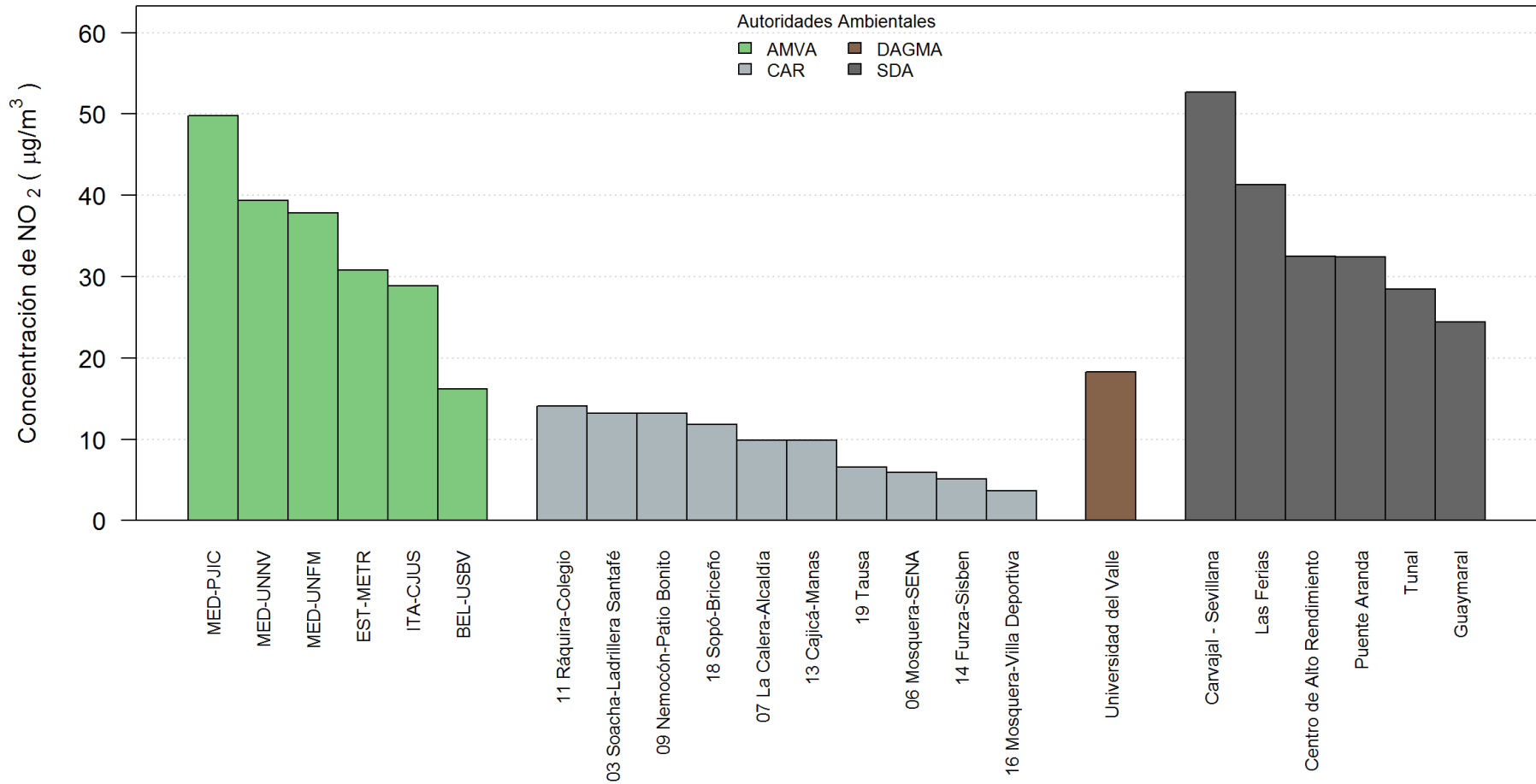
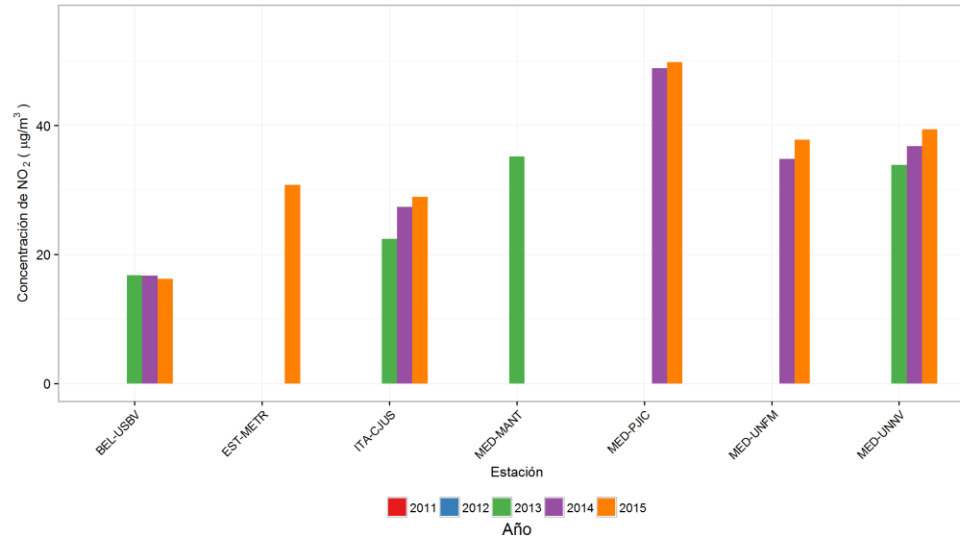
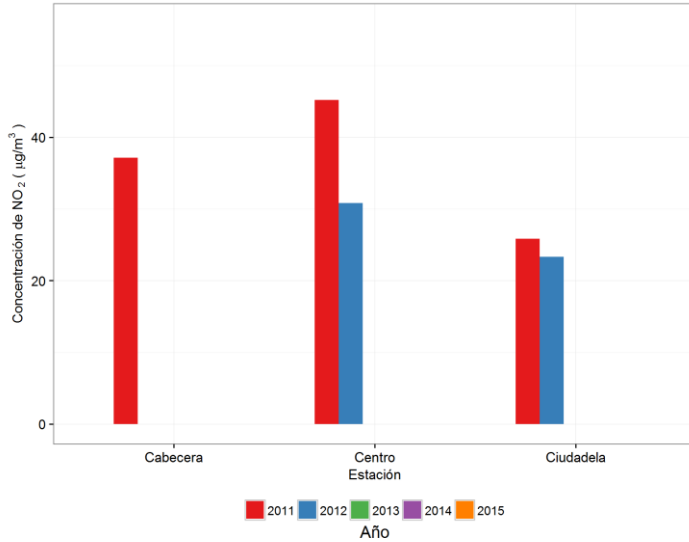


Figura 6-38. Concentraciones anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75% (AMVA, CDMB, CORANTIOQUIA).

AMVA. Concentraciones promedio anuales de NO₂ por estación de monitoreo



CDMB. Concentraciones promedio anuales de NO₂ por estación de monitoreo



CORANTIOQUIA. Concentraciones promedio anuales de NO₂ por estación de monitoreo

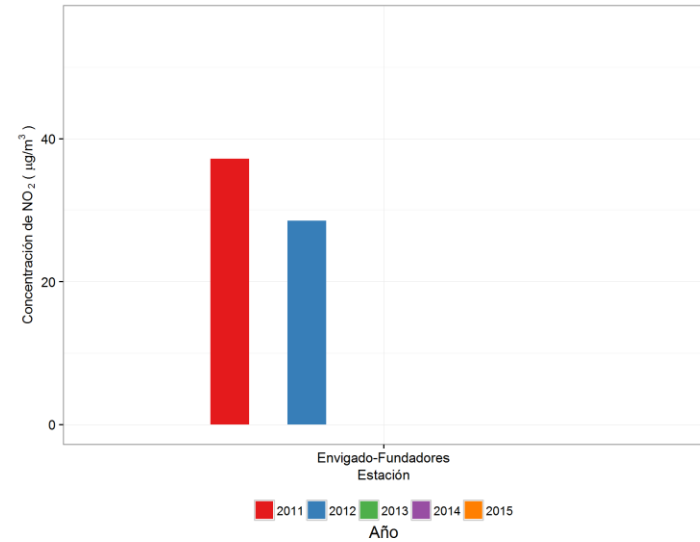
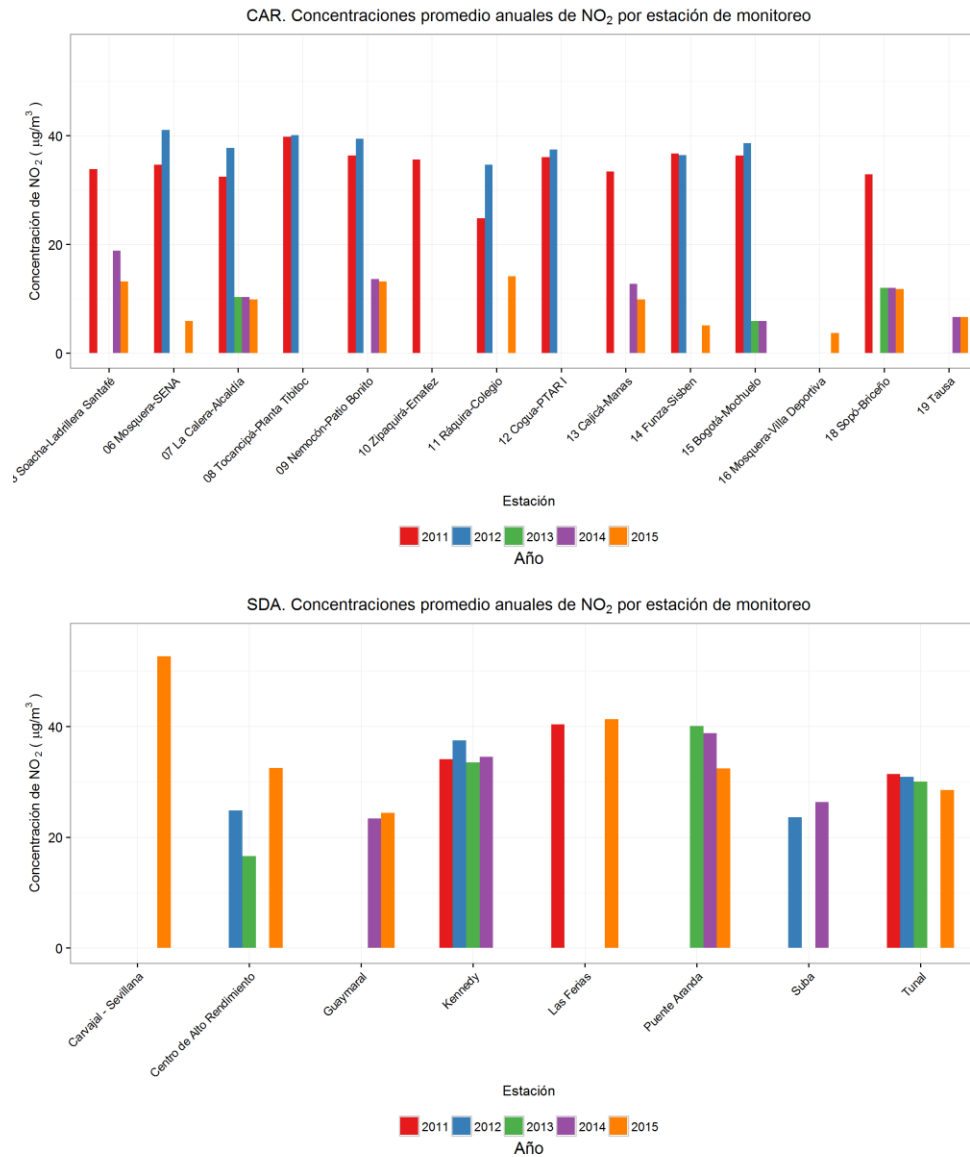
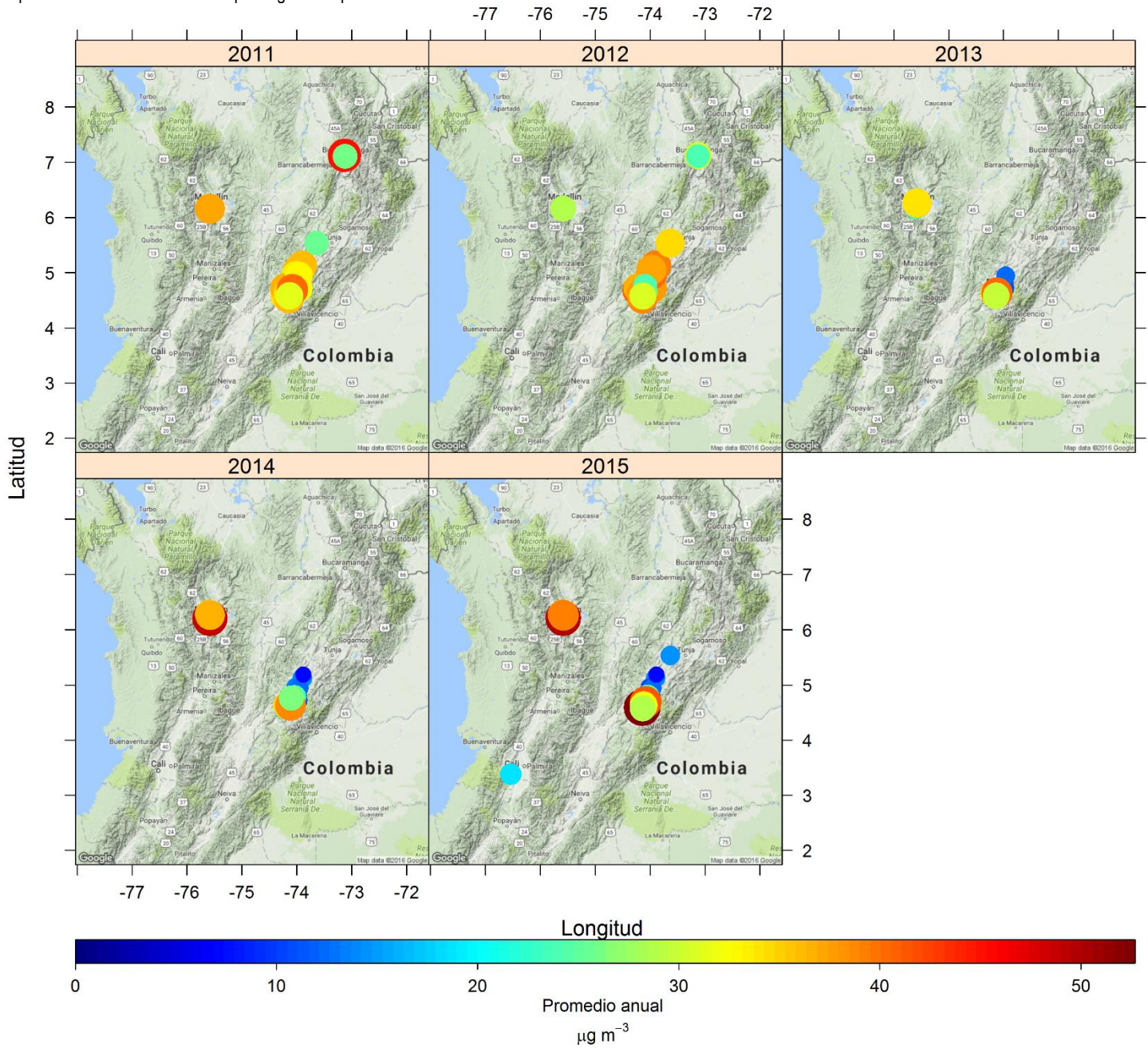


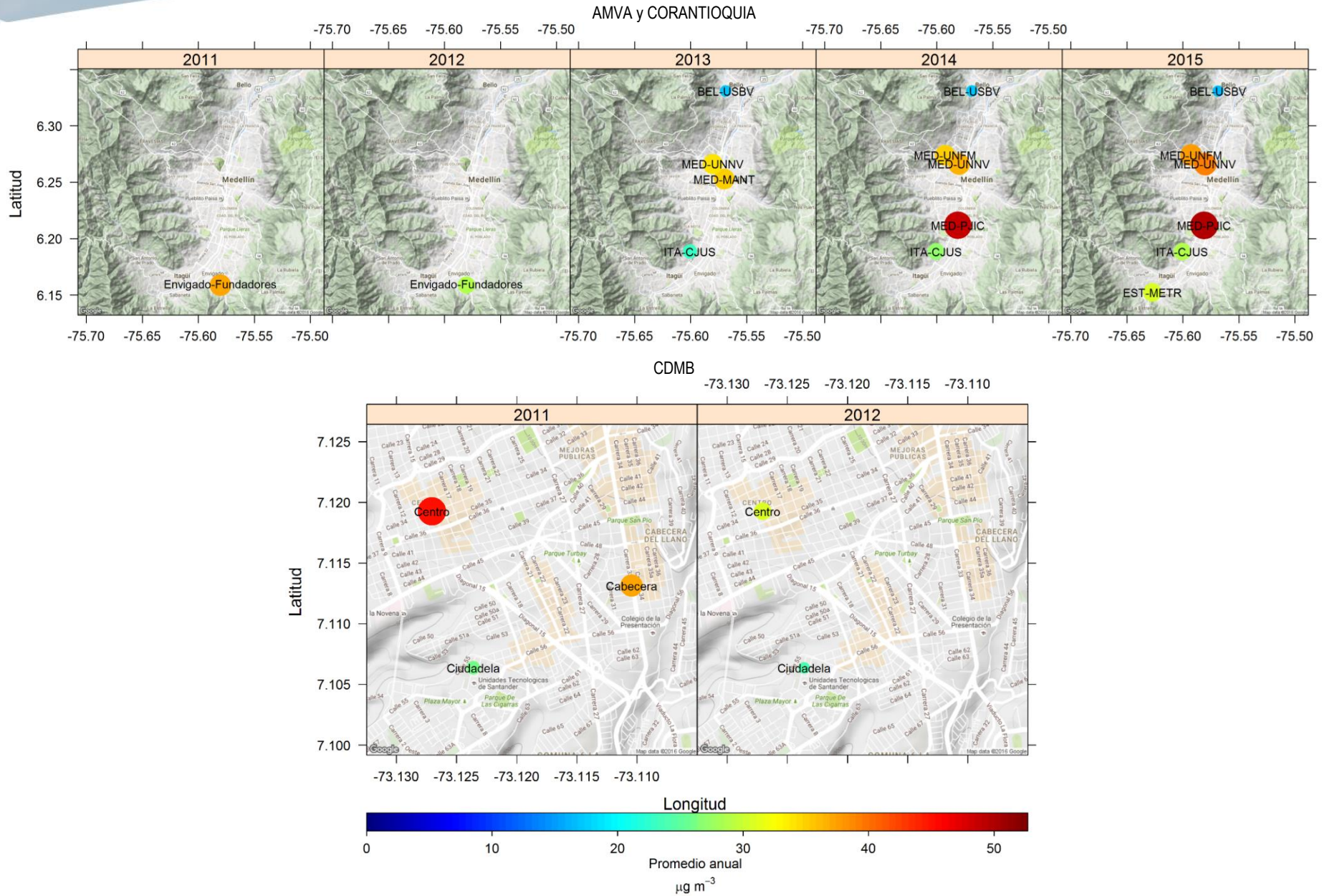
Figura 6-39. Concentraciones anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75% (CAR, SDA).



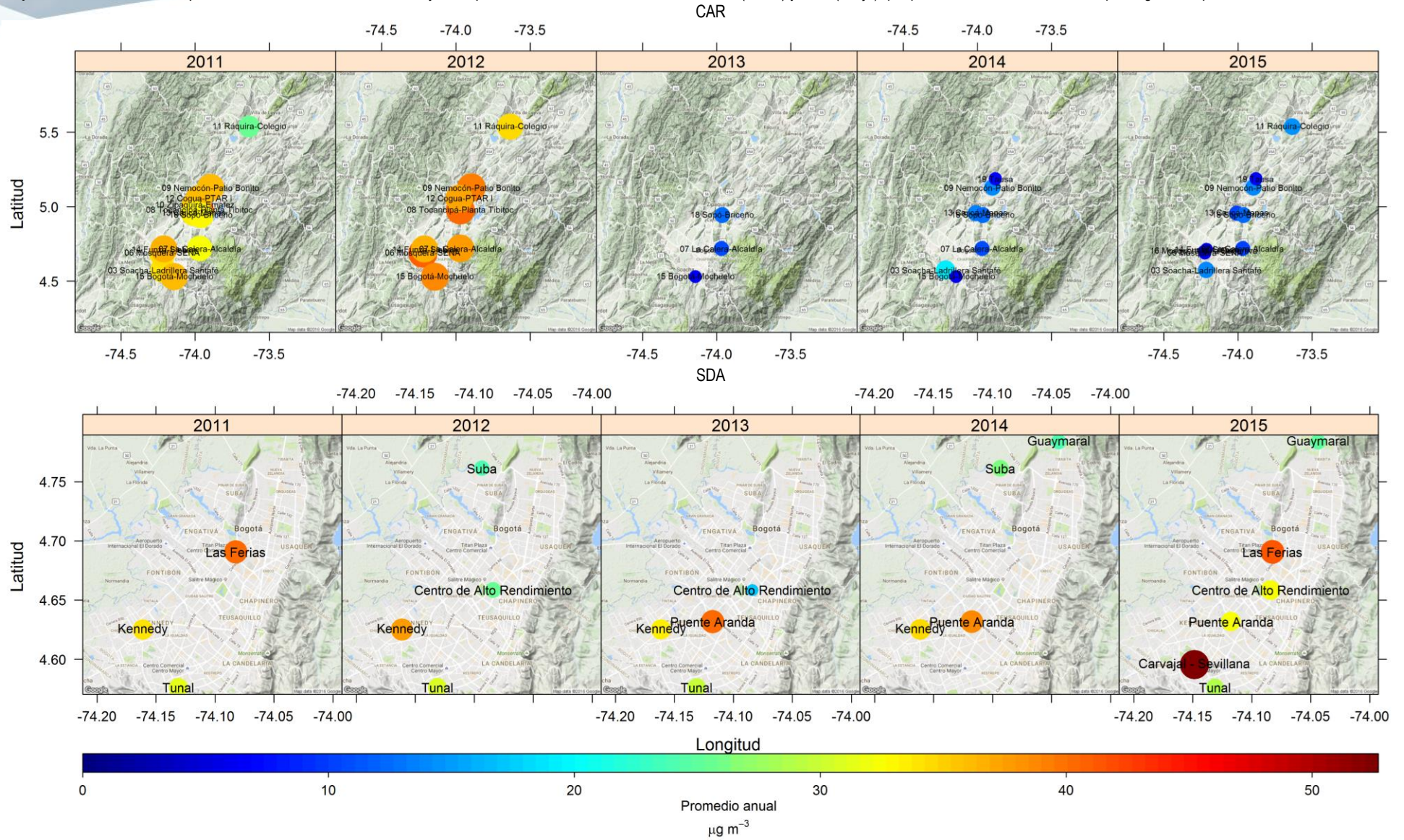
Mapa 6-16. Concentraciones promedio anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de AMVA, CAR, CDMB, CORANTIOQUIA, DAGMA y SDA que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%.



Mapa 6-17. Concentraciones promedio anuales de NO₂ para las estaciones de los SVCA de AMVA y CORANTIOQUIA (arriba; 2011 a 2015) y CDMB (abajo; 2011 y 2012) que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%.



Mapa 6-18. Concentraciones promedio anuales de NO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de CAR (arriba) y SDA (abajo) que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%.



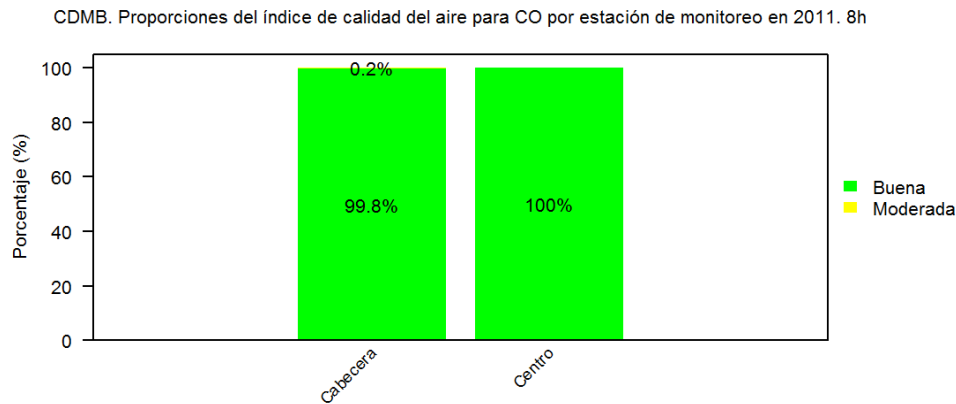
6.6. Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono tiene límites máximos permisibles en los mismos tiempos de exposición que el ozono con un valor de 10 mg/m³ para 8 horas y 40 mg/m³ para 1 hora. Al no existir un límite anual, no es posible realizar una comparación de los respectivos promedios y la evaluación de este contaminante únicamente se basa en la contabilización del número de días de excedencias. Este contaminante fue monitoreado en los SVCA del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), Bucaramanga (CDBM), Cali – Palmira – Yumbo (CVC y DAGMA) y Bogotá (SDA), los cuales cuentan con equipos automáticos; sin embargo, las series anuales de la CVC no cumplen con el criterio de representatividad temporal de mínimo 75%.

Entre las series anuales representativas, la máxima concentración en un tiempo de exposición de 8 horas fue 6,1 mg/m³ en la estación Cabecera de la ciudad de Bucaramanga (CDBM) en 2011, mientras que la máxima concentración horaria fue 9,0 mg/m³ en la estación Usaqué de Bogotá (SDA) el mismo año. Estos máximos no superan los límites máximos permisibles evidenciando la ausencia de excedencias para este contaminante.

El Índice de Calidad del Aire para el monóxido de carbono se calcula con base en los promedios móviles de 8 horas. Todos los valores de las series anuales que cumplieron con el criterio de cobertura temporal correspondieron a una calidad del aire “Buena”, exceptuando la estación Cabecera de Bucaramanga en el año 2011 donde se observa que el 0,2% de los datos mostró una categoría “Moderada”, que correspondió a un evento de alta concentración los días 24 y 25 de septiembre de 2011, como lo muestra la Figura 6-40. Es importante destacar que de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, no hay ningún efecto a la salud relacionado con el monóxido de carbono cuando se alcanza una categoría “Moderada”.

Figura 6-40. Proporciones de las categorías del Índice de Calidad del Aire (ICA) en el año 2011 para las estaciones Cabecera y Centro de la ciudad de Bucaramanga en el año 2011.



6.7. Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre fue monitoreado en seis SVCA que corresponden al Valle de Aburrá (AMVA), a la ciudad de Bucaramanga (CDMB), al Departamento de Cauca (CRC), a Cali – Yumbo (CVC y DAGMA) y a Bogotá (SDA). Sin embargo, tres SVCA tienen información representativa, es decir, series anuales con una cobertura temporal igual o mayor a 75%, los cuales son CDMB, DAGMA y SDA.

La Resolución 610 de 2010 contempla tres límites máximos permisibles que corresponden a 80 µg/m³, 250 µg/m³ y 750 µg/m³ en tiempos de exposición de 1 año, 24 horas y 3 horas (promedios móviles), respectivamente. Los SVCA mencionados disponen de datos horarios para todos los equipos que monitorearon este contaminante.

6.7.1. Concentraciones promedio anuales

La Figura 6-41 y la Figura 6-42 presentan las concentraciones promedio anuales de dióxido de azufre entre 2011 y 2015 para las series que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%. El límite máximo permisible anual no fue superado por ninguna estación durante los cinco años analizados ya que la máxima concentración anual fue 23 µg/m³ en el año 2011 para la estación Carvajal – Sevillana ubicada en Bogotá, valor que se encuentra incluso por debajo de la mitad del nivel normativo, es decir, 40 µg/m³.

Para la ciudad de Bogotá, las mayores concentraciones de SO₂ se presentaron en las estaciones Carvajal – Sevillana y Kennedy localizadas en la zona suroccidental. El área de influencia de Carvajal – Sevillana se caracteriza por la presencia de actividad industrial y de vehículos de carga pesada cuyos procesos de combustión emiten este contaminante a la atmósfera. Esta observación se refuerza si se tiene en cuenta que esta estación registró altas concentraciones de material particulado PM_{2.5}, PM₁₀ y PST durante los cinco años de estudio.

Con respecto a la ciudad de Bucaramanga se dispone de información representativa para las estaciones Cabecera en 2011 y Centro en 2011 y 2012. Para la ciudad de Cali se cuenta con la estación ERA – Obrero en 2011. El promedio anual de estas cuatro series no supera los 15 µg/m³, valor que se encuentra relativamente alejado del límite máximo permisible.

6.7.2. Tendencias entre 2011 y 2015

Las tendencias interanuales para los SVCA de Bucaramanga y Bogotá se presentan en la Figura 6-43. Con respecto a Bucaramanga (CDMB) se observa una tendencia de aumento en la estación Centro; para la ciudad de Cali solamente hay una serie anual representativa, lo que imposibilita el análisis del comportamiento interanual.

En Bogotá (SDA) se evidencia una disminución progresiva de los niveles en Carvajal – Sevillana (entre 2011 y 2013), Centro de Alto Rendimiento (entre 2012 y 2015), Las Ferias (entre 2011 y 2014), Puente Aranda (entre 2011 y 2015) y San Cristóbal (de 2014 a 2015). En Suba se presentó la tendencia contraria ya que la concentración promedio anual se incrementó entre 2011 y 2014.

6.7.3. Comparación con las tendencias en el periodo 2007 – 2010

En esta sección se presenta la comparación de las concentraciones anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 con respecto al periodo 2007 – 2010.

- **CDMB:** se dispone de información representativa hasta el año 2012 y solamente es posible la comparación con la estación Centro. No se observan variaciones significativas.

- **SDA:** se observa que en general las concentraciones descendieron, especialmente para Carvajal – Sevillana (antes Carvajal – Sony), Centro de Alto Rendimiento (antes Parque Simón Bolívar), Fontibón, Kennedy, Las Ferias (antes Las Ferias – Carrefour), Puente Aranda y Suba. Esta variación está parcialmente asociada a la disminución del contenido de azufre en el combustible diésel.

6.7.4. Excedencias de los límites máximos permisibles

El promedio móvil de 3 horas más alto registrado en el periodo 2011 – 2015, entre las estaciones que cumplieron con el criterio de cobertura temporal, fue $173 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Carvajal – Sevillana de la SDA en 2013. Esta magnitud es considerablemente inferior al respectivo límite máximo permisible de $750 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, la máxima concentración diaria fue $93 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la cual fue registrada en esta misma estación en el año 2011 y es inferior al límite máximo permisible de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En consecuencia, no se registraron excedencias para este contaminante en los dos tiempos de exposición considerados.

6.7.5. Mapas de las concentraciones anuales

El Mapa 6-19 presenta la distribución de las concentraciones promedio anuales de SO_2 entre 2011 y 2015 para las estaciones con una representatividad temporal no menor a 75%. En concordancia con la discusión previa, en 2011 y 2012 se observa que la estación Carvajal – Sevillana de Bogotá presentó una concentración promedio relativamente alta en comparación con las pertenecientes a los otros SVCA; para los años 2013 a 2015 solamente se cuenta con información de la SDA.

Mayores detalles de la representación espacial se encuentran en el Mapa 6-20 para CDMB (2011 y 2012) y para la SDA.

6.7.6. Índice de Calidad del Aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) de las concentraciones de SO_2 fue calculado para un tiempo de exposición de 24 horas. En el caso de equipos automáticos, se usaron los promedios aritméticos móviles para obtener un dato en cada hora; para equipos manuales, cuyo tiempo de medición es diario, se tomaron como base los datos sin procesar que son proporcionados por la autoridad ambiental, lo que significa un dato por día.

Para Bogotá, la estación Usaquén presentó una calidad del aire “Moderada” únicamente en el 0,3% de sus datos para el año 2011. Los resultados evidencian en general que los niveles de SO_2 en esta ciudad en los años estudiados no son críticos en términos de salud, a diferencia de los registrados para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. La categoría “Moderada” de SO_2 no representa ningún efecto adverso a la salud, de acuerdo con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire – Manual de Operación (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En el caso de las estaciones de la CDMB, el 100% de los datos válidos de las series representativas presentaron una calidad del aire “Buena”.

Figura 6-41. Concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2014 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.

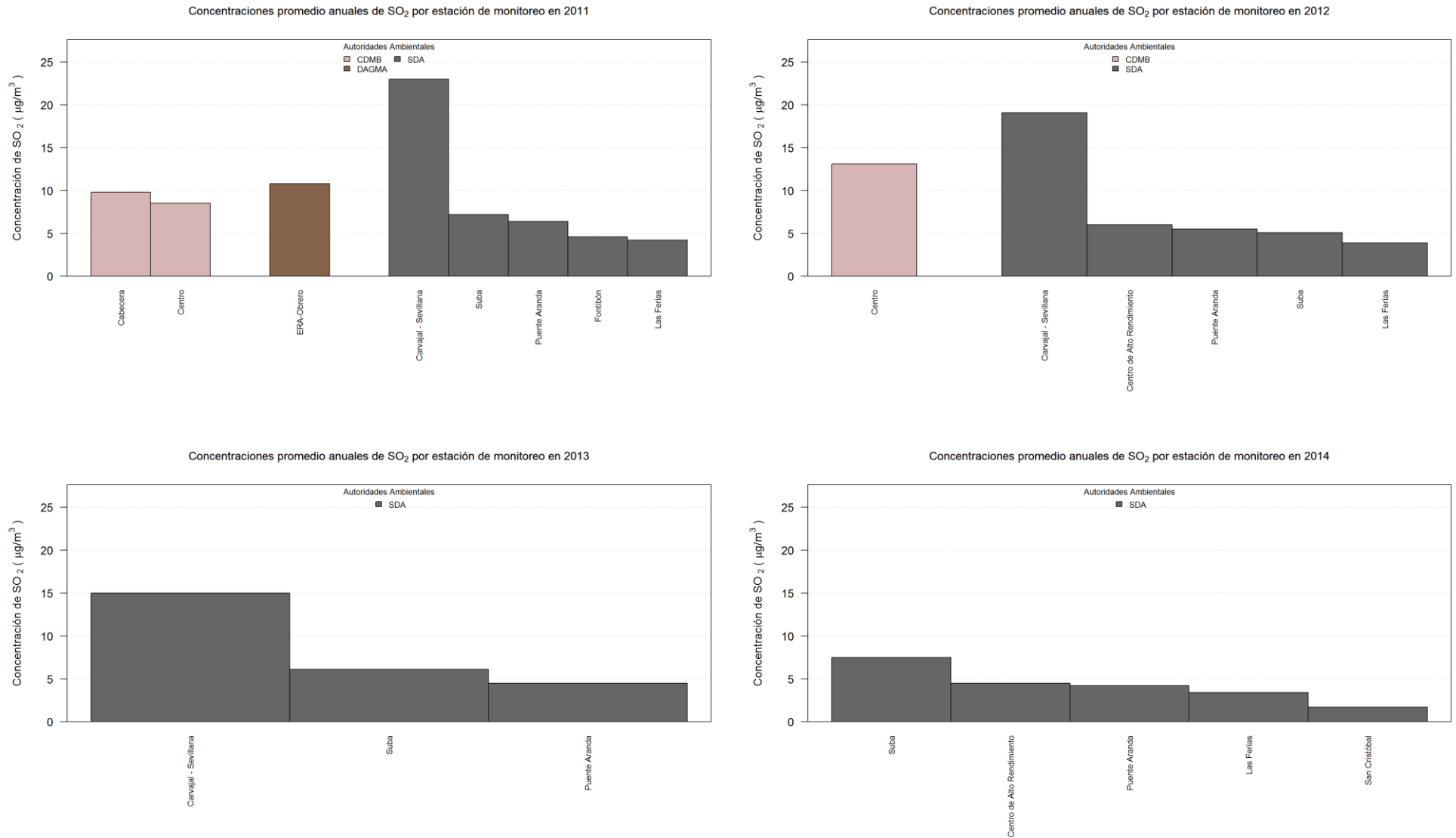


Figura 6-42. Concentraciones promedio anuales de SO₂ en 2015 de las estaciones de los SVCA de Colombia que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.

Concentraciones promedio anuales de SO₂ por estación de monitoreo en 2015

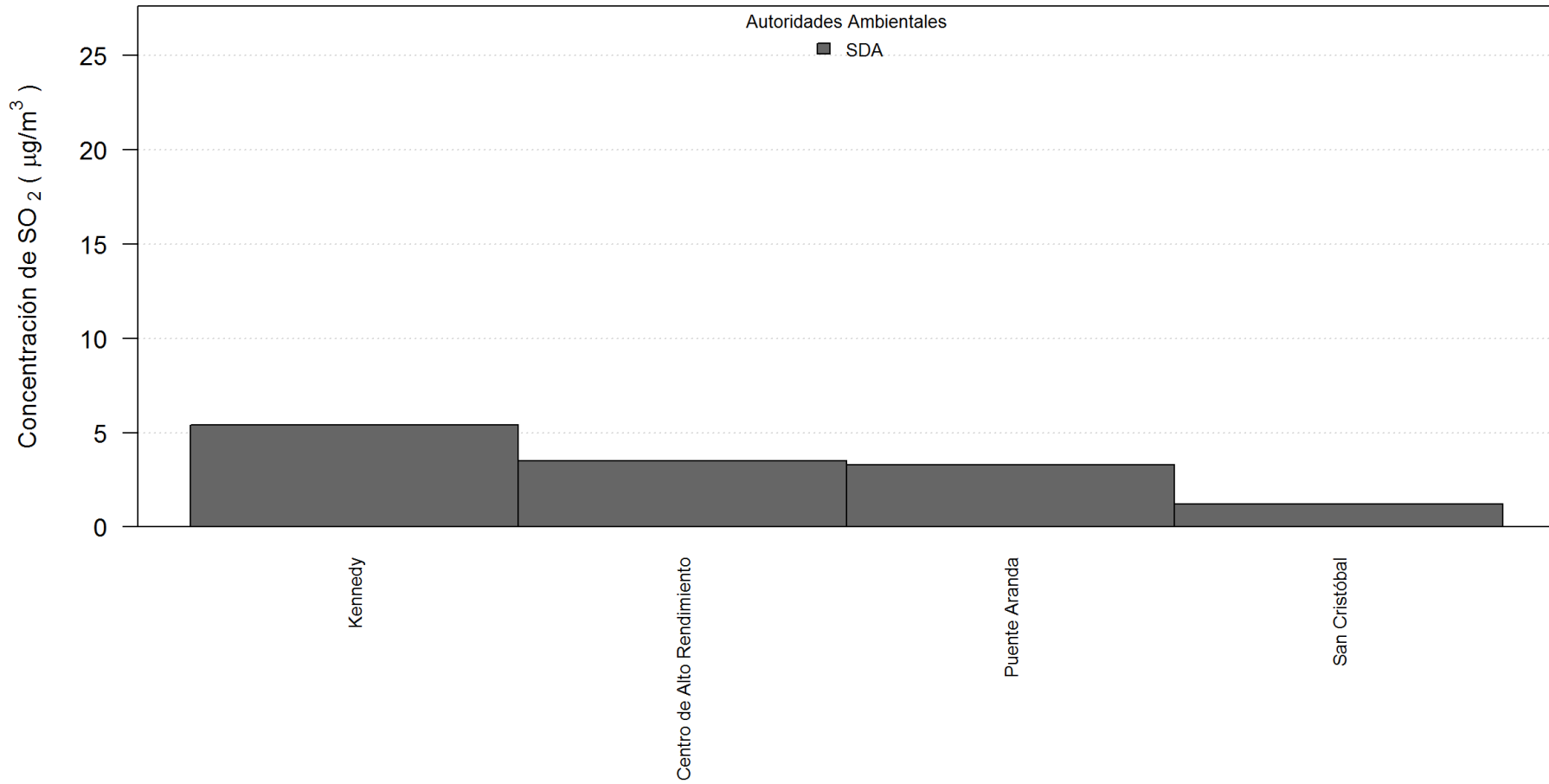
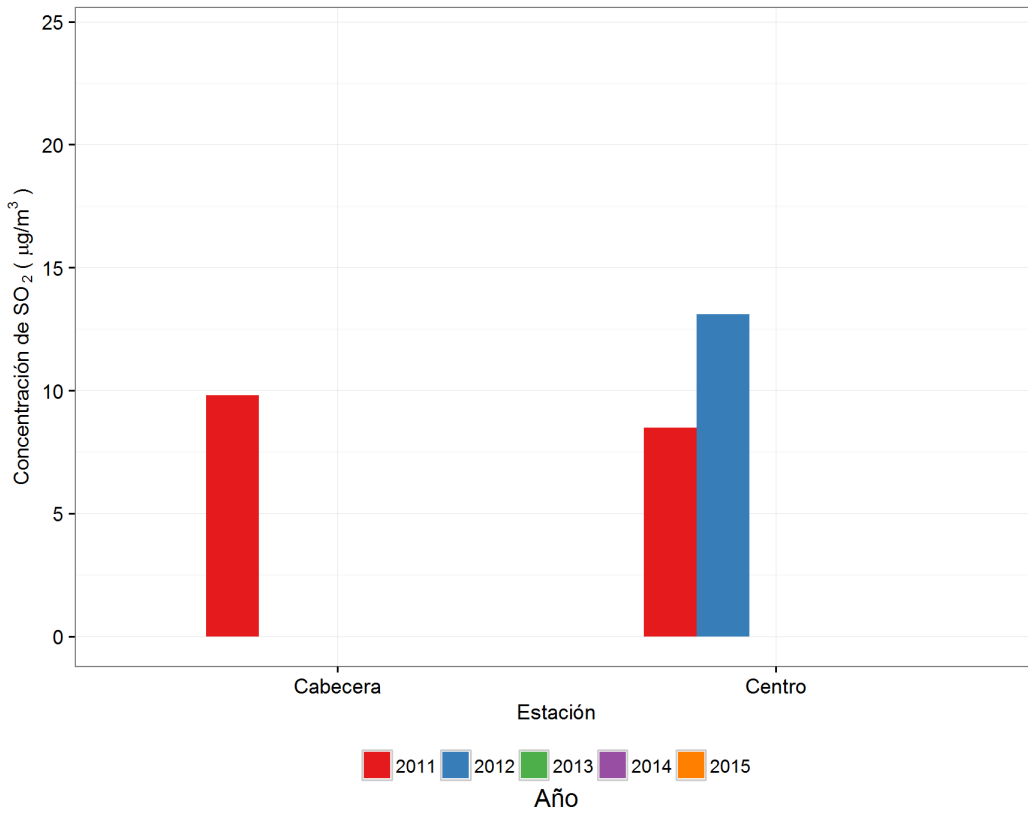
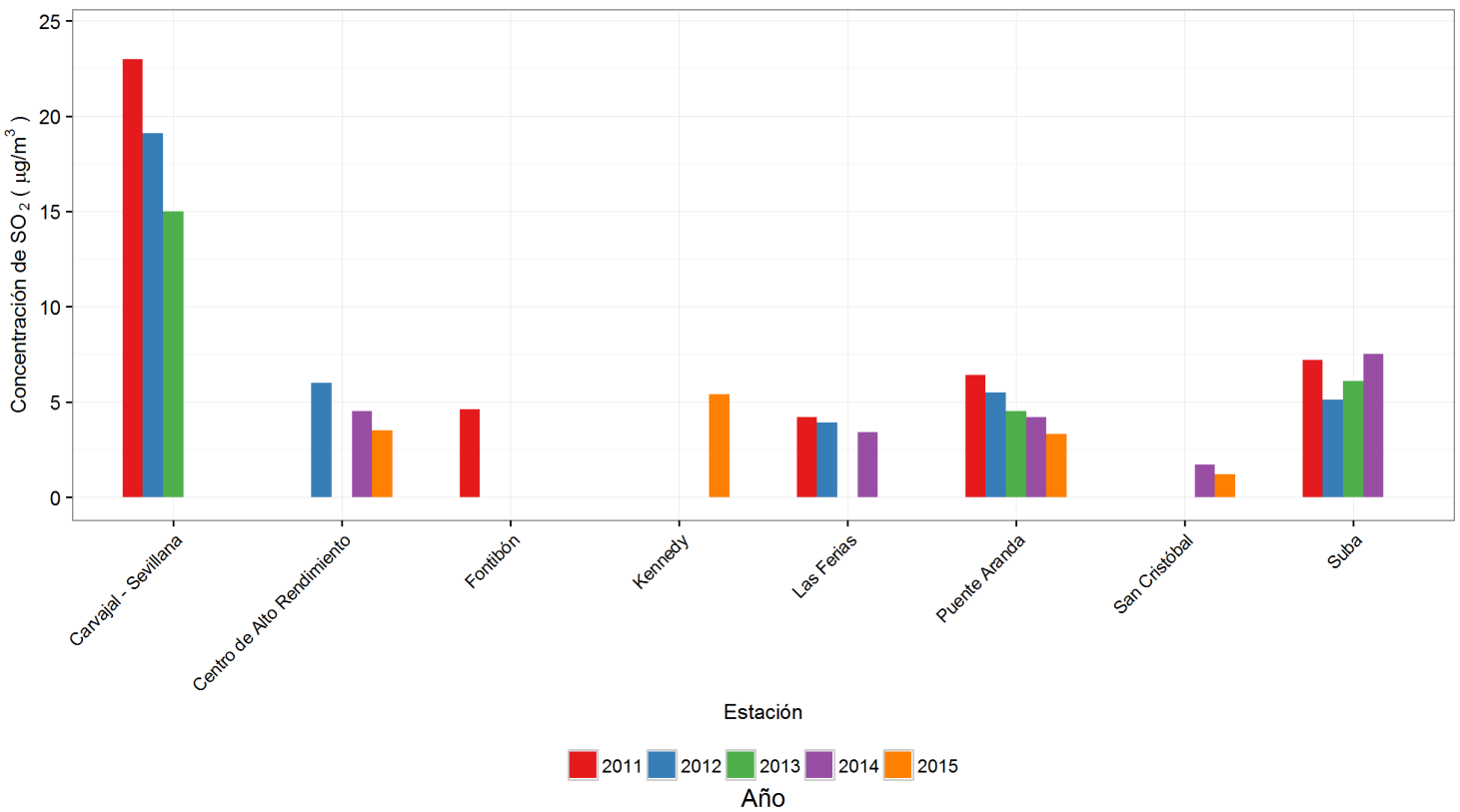


Figura 6-43. Concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 de las estaciones de los SVCA CDMB y SDA que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.

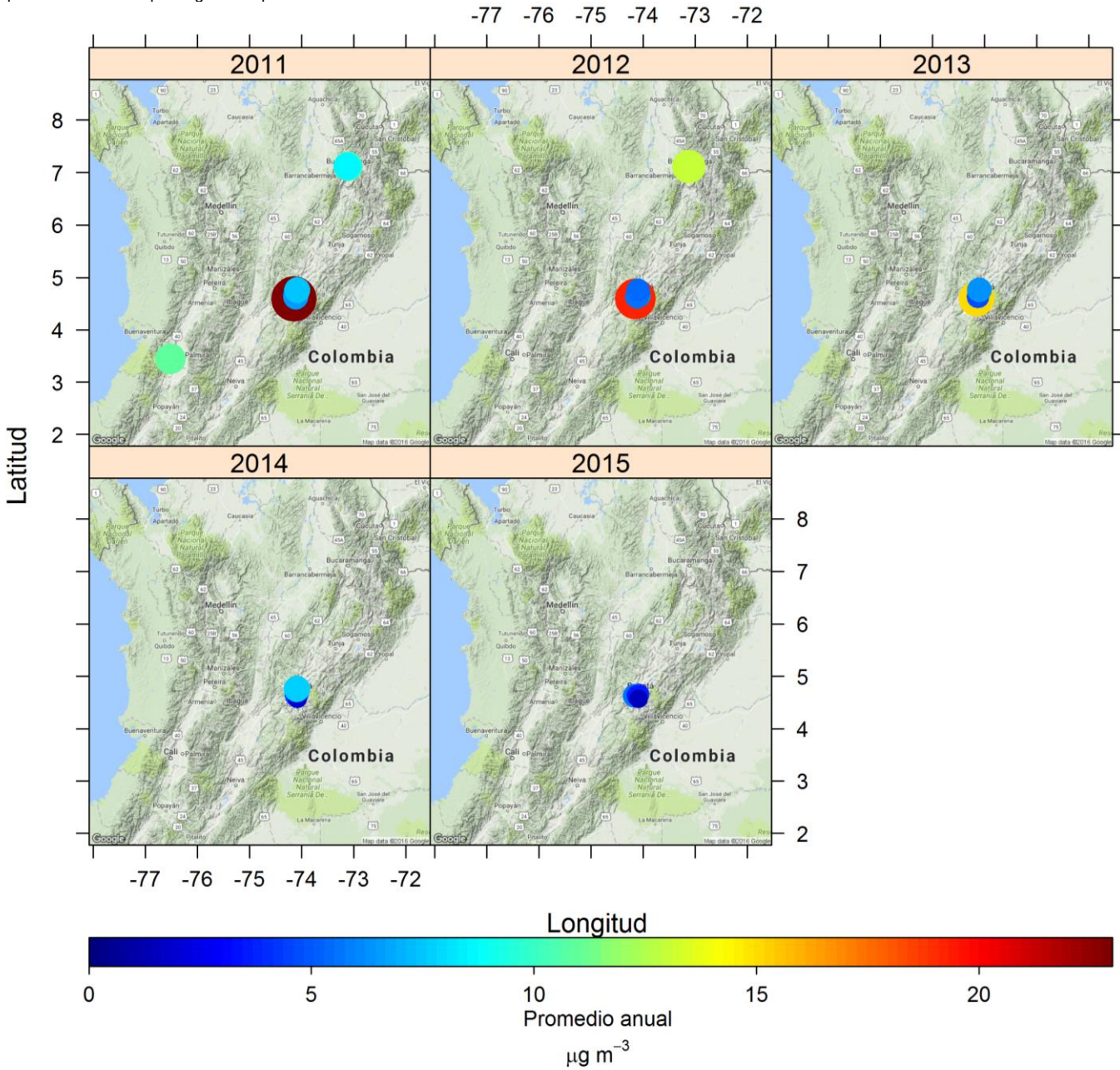
CDMB. Concentraciones promedio anuales de SO₂ por estación de monitoreo



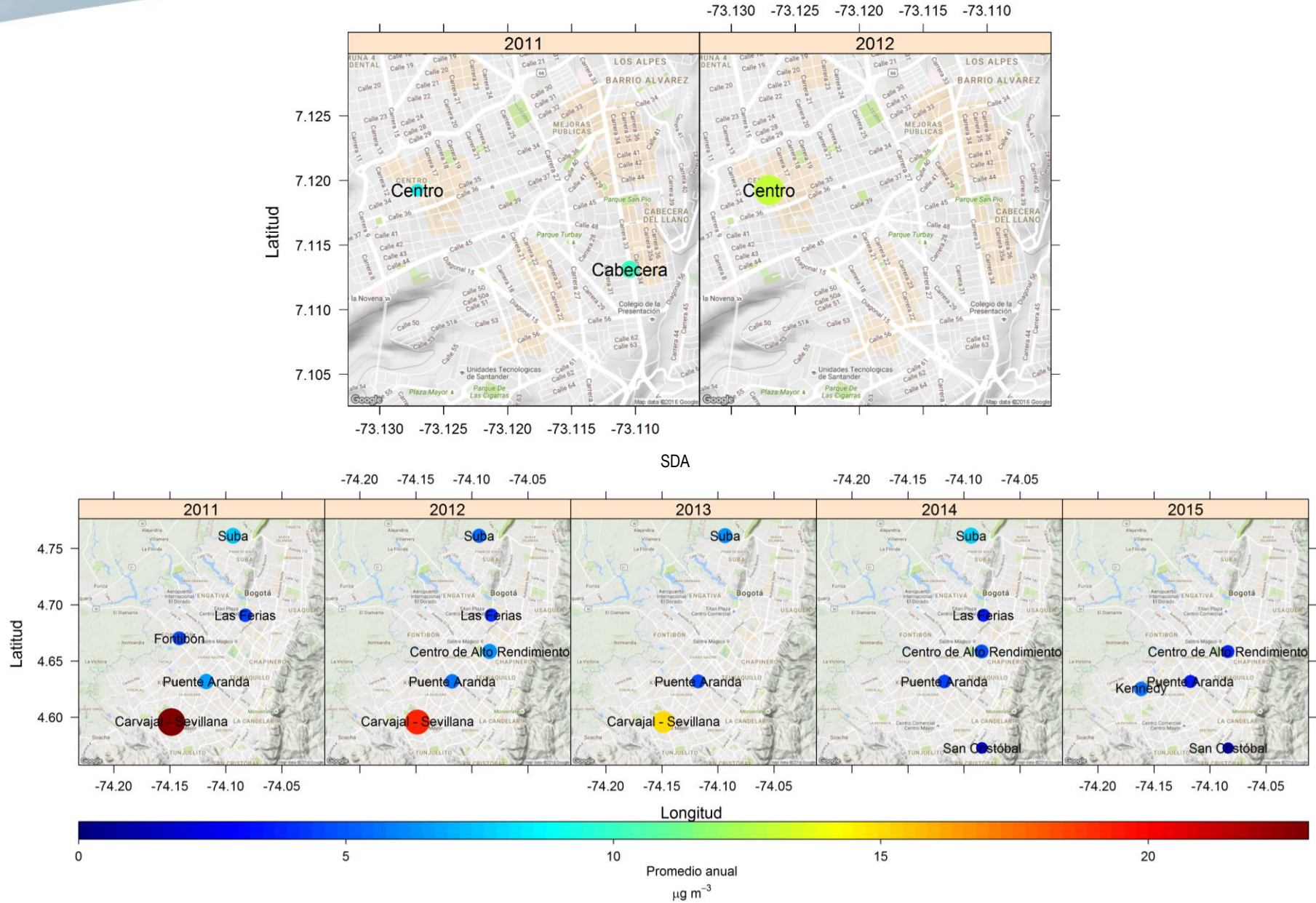
SDA. Concentraciones promedio anuales de SO₂ por estación de monitoreo



Mapa 6-19. Mapa de Colombia con las concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA que presentaron una representatividad temporal igual o superior a 75%.



Mapa 6-20. Concentraciones promedio anuales de SO₂ entre 2011 y 2015 para las estaciones de los SVCA de CDMB (arriba) y SDA (abajo) que cumplieron con el criterio de representatividad temporal de 75%.



7. Análisis de la calidad del aire y su relación con variables meteorológicas

En este capítulo se realiza un análisis del cruce de datos de concentraciones de contaminantes atmosféricos con datos de variables meteorológicas para cuatro autoridades ambientales de Colombia, en particular para el año 2015.

Teniendo en cuenta la alta variabilidad del comportamiento de la atmósfera en cortos periodos de tiempo y la importancia de conocer en un nivel de detalle apropiado la influencia de la meteorología en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, es más apropiado recurrir a la información de los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire con estaciones automáticas que tienen una resolución temporal de 1 hora; sin embargo, existen SVCA en Colombia cuyos equipos manuales limitan el análisis a resoluciones temporales diarias y cuyo comportamiento es importante analizar teniendo en cuenta su ubicación en zonas con comportamientos particulares de contaminación atmosférica.

Con el objetivo de analizar únicamente comportamientos representativos, solamente se tuvieron en cuenta aquellas series anuales que presentaron una cobertura temporal igual o superior a 75%, el cual es el límite establecido en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Los criterios mencionados delimitaron el análisis a cuatro SVCA a lo largo del país, las cuales se listan a continuación junto con la autoridad ambiental competente:

- Bogotá – Secretaría Distrital de Ambiente – SDA.
- Cesar – Corporación autónoma Regional del Cesar - CORPOCESAR
- Cali – Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente – DAGMA.
- Valle de Aburrá – Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA.

Existen varias perspectivas desde las cuales es posible realizar un análisis conjunto de la relación existente entre las variables meteorológicas y de calidad del aire donde la contribución de cada una aumenta la certeza sobre el origen, destino, variabilidad e influencia de los contaminantes atmosféricos en la zona circundante de cada una de las estaciones analizadas. Entre la información meteorológica disponible, el comportamiento del viento (dirección y velocidad) ejerce un papel primordial en las discusiones aquí plasmadas y fue el eje principal a partir del cual se desarrollaron los análisis.

La herramienta principal que permitió el procesamiento de las bases de datos fue el software computacional de código abierto R (R Core Team, 2016), especialmente el paquete *openair* (Carslaw & Ropkins, 2012; Carslaw D. C., 2015) los cuales proporcionan herramientas de código abierto para el análisis de información de calidad del aire, la cual por supuesto incluye la relacionada con la meteorología.

Para cada una de las autoridades ambientales elegidas, se presentaron gráficos que pueden generarse a partir de esta correlación de datos, con su respectiva discusión. El rango de tiempo considerado en cada figura es anual, teniendo en cuenta que los datos analizados abarcan un amplio espectro que va desde el año 2011 hasta el año 2015.

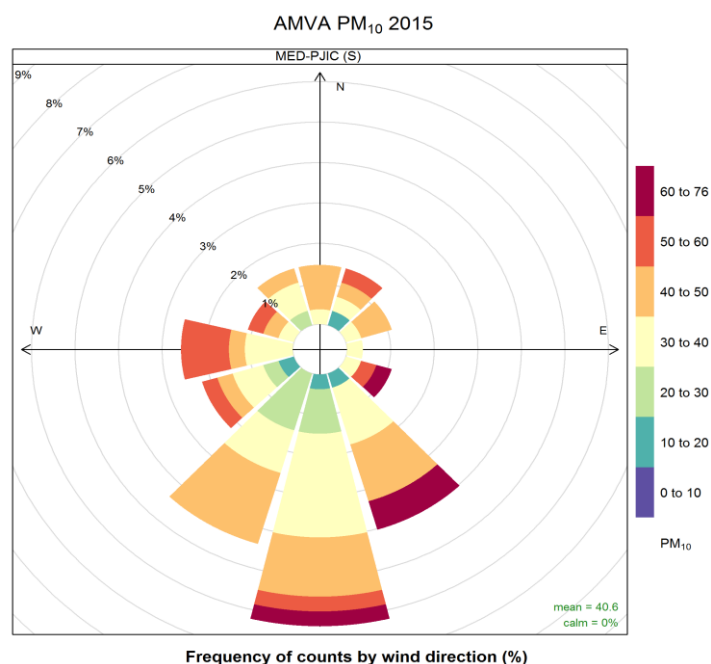
Debido a la gran cantidad de información disponible para realizar la correlación de datos entre 2011 y 2015, es posible obtener numerosas representaciones que abarcan un amplio espectro de análisis. Por tanto, el enfoque será la presentación de ciertos tipos de gráficos que se consideraron significativos por la información que brindan y su correspondiente discusión con el fin de caracterizar la calidad del aire para las estaciones elegidas bajo los criterios previamente descritos.

7.1. Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)

La primera estación elegida es Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (MED-PJIC) para la cual se analizaron los datos del parámetro PM₁₀ para el año 2015 junto con los datos de dirección de los vientos a través de rosas de contaminación. Estos gráficos son similares a las rosas de vientos; sin embargo, difieren en que la clasificación de los intervalos de dirección del viento se hace por rangos de concentración de un contaminante determinado en lugar de velocidad del viento. Esta perspectiva permite identificar de dónde provienen las concentraciones más altas y con qué frecuencia; es decir, el porcentaje de tiempo en el cual la concentración se encuentra en un rango específico dentro de un intervalo de dirección del viento.

La Figura 7-1 corresponde a la rosa de contaminación por PM₁₀ para la estación MED-PJIC en el año 2015. Primero se puede observar que los vientos provienen predominantemente de la dirección sur de la estación y que presentan concentraciones de PM₁₀ que oscilan principalmente entre 30 y 50 µg/m³. También se puede observar que las mayores concentraciones de PM₁₀ provienen de la dirección sureste (50 a 76 µg/m³) lo que probablemente indica que hacia esa dirección existen fuentes de emisión puntuales o algún corredor vial; también podría deberse a fenómenos de re-suspensión de partículas o erosión. Los vientos tanto del norte como del este, no realizan un aporte significativo a la calidad del aire. En la parte inferior izquierda se puede ver en letra verde datos de promedio de concentración y porcentaje de calmas también.

Figura 7-1. Rosa de contaminación por PM₁₀ para la estación MED-PJIC de AMVA de 2015, la cual presentó representatividad temporal superior a 75% en velocidad del viento, dirección del viento y concentración de PM₁₀. Concentraciones en µg/m³.



Para las estaciones Universidad San Buenaventura (BEL – USBV), Institución Educativa Col. – Girardota (GIR – IECO) y Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) se generaron gráficos polares anulares los cuales describen la variación de las concentraciones de los contaminantes en función de las horas del día. Este tipo de representación involucra adicionalmente la dirección del viento facilitando la diferenciación del comportamiento temporal de los datos en función de la localización de las fuentes de emisión con respecto a la estación de monitoreo. Dependiendo de la dirección del viento, los gráficos polares anulares permiten diferenciar influencia de emisión de vías, industrias o transporte de áreas remotas, contribuyendo junto con los otros gráficos a reducir la incertidumbre respecto a la identificación de las fuentes que afectan un área determinada.

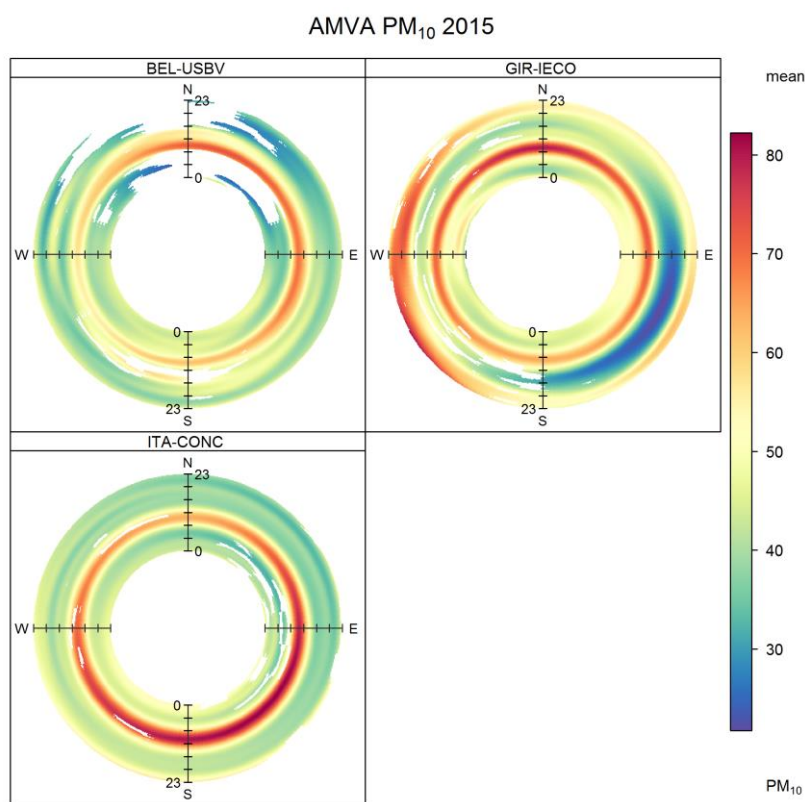
La Figura 7-2 permite hacer una comparación entre las estaciones nombradas anteriormente. La estación BEL-USBV presenta los mejores índices de calidad del aire frente a las otras dos estaciones; sin embargo se puede ver que entre las 8:00 y 12:00 del día, se presenta el período en el cual la calidad del aire es la más baja y además, esa contaminación proviene de la dirección noreste. Es probable que la calidad del aire se vea afectada

por ser las horas pico de tráfico vehicular lo cual, en otras palabras, sugiere que las fuentes móviles son las que presentan mayor influencia en los niveles de contaminación en esta estación.

Una situación muy similar en cuanto al período en el cual se presentan los peores índices de calidad de aire y que puede tener las mismas causas de deterioro es la estación ITA-CONC. Sin embargo, se puede observar que las altas concentraciones de PM_{10} no parecen provenir de una dirección en particular aunque las direcciones Sur y Este evidencian un mayor aporte de la contaminación para esta estación.

Por último, la estación GIR – IECO además de presentar una fenomenología similar a la de las dos estaciones anteriormente descritas (y en particular la contaminación proviene principalmente de la dirección norte); se presentan un fenómeno de contaminación en altas horas de la noche (aproximadamente entre las 19:00 y 23:59) proveniente de la dirección Oeste, situación que puede deberse a que en esa dirección se ubica la zona industrial de Girardota así como los corredores viales y el tráfico pesado en horas de la noche.

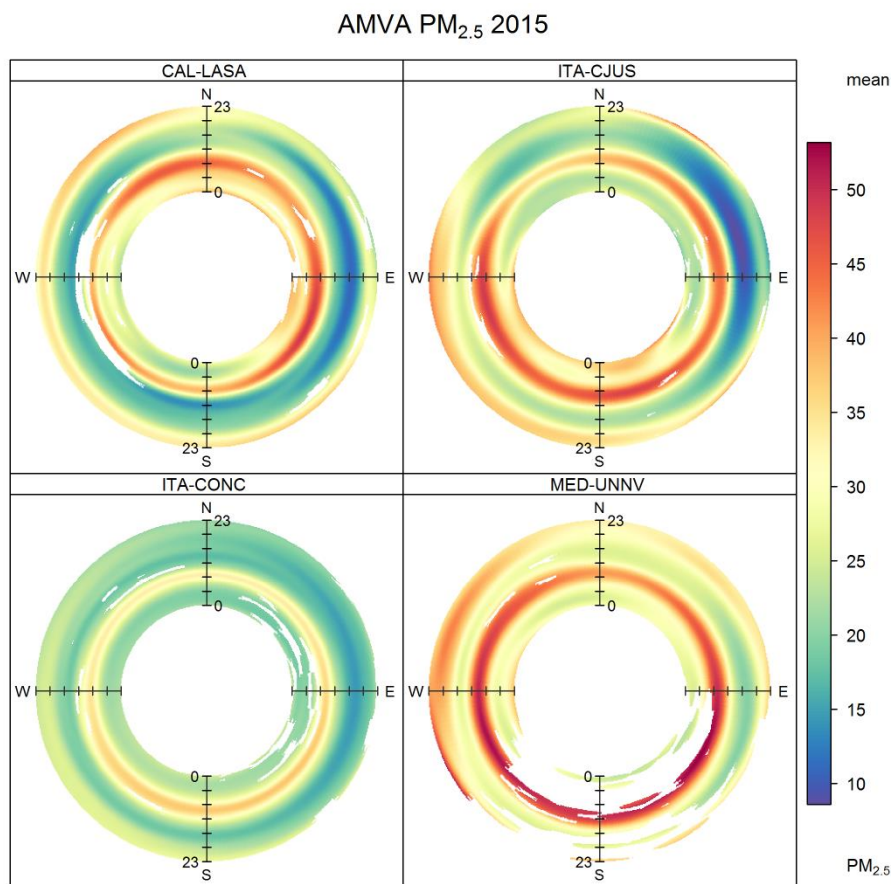
Figura 7-2. Diagramas polares anulares para las concentraciones de PM_{10} en las estaciones BEL-USBV, GIR-IECO e ITA-CONC de AMVA en 2015. Concentraciones en $\mu g/m^3$.



Para el parámetro $PM_{2.5}$, se tomaron datos de cuatro estaciones representativas: Corporación Lasallista (CAL – LASA), Casa de Justicia Itagüí (ITA – CJUS), Colegio Concejo de Itagüí (ITA – CONC) y Estación Móvil 2 - UNAL (MED-UNNV) representados en la Figura 7-3. De estas, la estación ITA – CONC (esquina inferior izquierda) presenta para el año 2015 las concentraciones más bajas a lo largo del día, comparadas con las otras estaciones. Lo anterior es consistente teniendo en cuenta que dicha estación se ubica en límites urbanos del municipio de Itagüí mientras que las otras estaciones se ubican en zonas mucho más urbanizadas e influenciadas por vías de alto tráfico vehicular.

Contrariamente, las estaciones ITA-CJUS y MED-UNNV (ubicadas a la derecha de la Figura 7-3) presentan concentraciones significativas de $PM_{2.5}$ (más de $40 \mu g/m^3$) durante el horario de 8:00 a 12:00 y adicionalmente, ambas se caracterizan por presentar incrementos en las concentraciones en horas de la noche (20:00 a 23:59 horas). Para finalizar, todas las estaciones se caracterizan por presentar niveles aceptables de calidad del aire entre las 12:00 y 20:00.

Figura 7-3. Diagramas polares anulares de las concentraciones de PM_{2.5} para las estaciones CAL-LASA, ITA-CJUS, ITA-CONC y MED-UNNV de AMVA en 2015. Concentraciones en µg/m³.



7.2. Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR)

En este caso, se analizan dos parámetros PM₁₀ y PM_{2.5} a través de rosas de contaminación para el año 2015. En el caso de PM₁₀, se tomaron como referencia las estaciones ZM02 La Jagua Centro y ZM22 Casacará que se representan gráficamente en la Figura 7-4.

La estación ZM02 La Jagua Centro (izquierda de la Figura 7-4) se caracteriza por los vientos provenientes de la dirección sur principalmente y que afectan de manera significativa la calidad del aire circundante de la estación. Por otra parte, aunque del Este no provienen corrientes frecuentes de aire, sí aportan concentraciones altas de PM₁₀ (entre 80 y 125 µg/m³). De la dirección Norte, el aporte a la calidad del aire es prácticamente nulo.

Para la estación ZM22 Casacará, los vientos provenientes del Sur y Sureste son los que prácticamente caracterizan la calidad del aire en el área circundante de esta estación (ver Figura 7-4 derecha y Figura 7-5) mientras que del Norte el aporte es nulo. Para PM₁₀, las concentraciones son relativamente bajas (ubicada en zona rural con poca influencia de tráfico) y no exceden los 70 µg/m³ (promedio 31.1 µg/m³). En el caso de PM_{2.5}, predominan las concentraciones entre 10 y 25 µg/m³. Dadas las condiciones particulares de esta estación, los esfuerzos por mejorar la calidad del aire en esta área pueden enfocarse en caracterizar las fuentes de emisión que se ubican al sur de la estación.

Como observación final respecto a la Figura 7-4 y la Figura 7-5, nótese que la suma de los porcentajes (barras en cada dirección) de cada rosa de contaminantes no es del 100%. Esto se debe a que no necesariamente cada dato de dirección y velocidad de viento tiene asociado un dato o datos de uno o más contaminantes analizados (depende de cada estación y su frecuencia de monitoreo de cada contaminante).

Figura 7-4. Rosas de contaminación de las concentraciones de PM₁₀ para las estaciones ZM02 La Jagua Centro y ZM22 Casacará en 2015. Concentraciones en µg/m³.

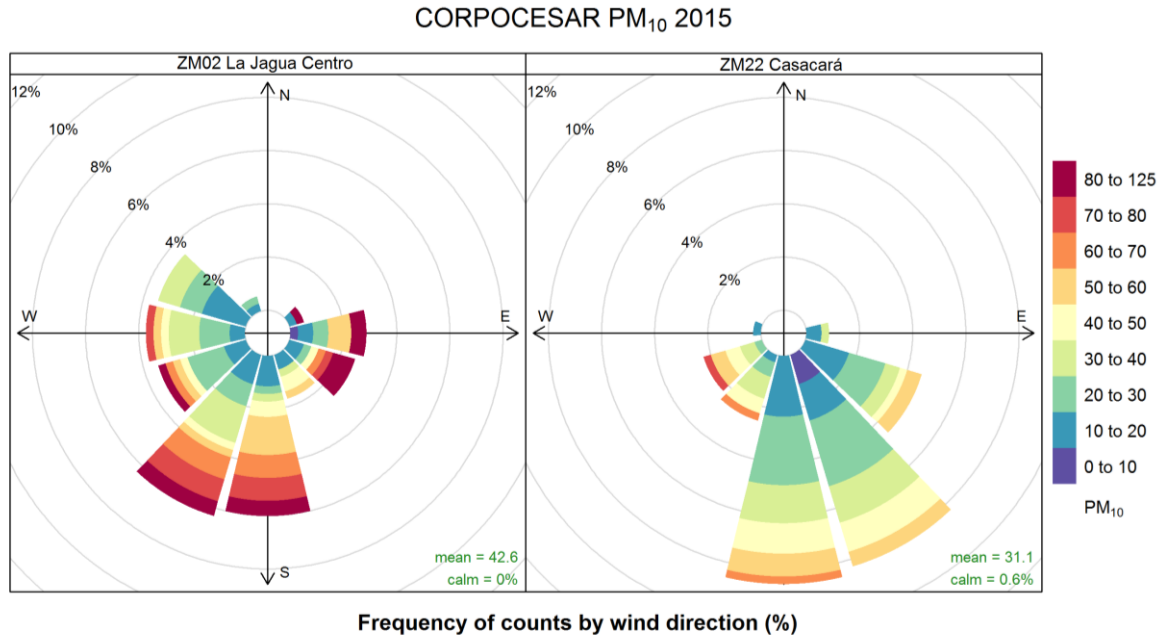
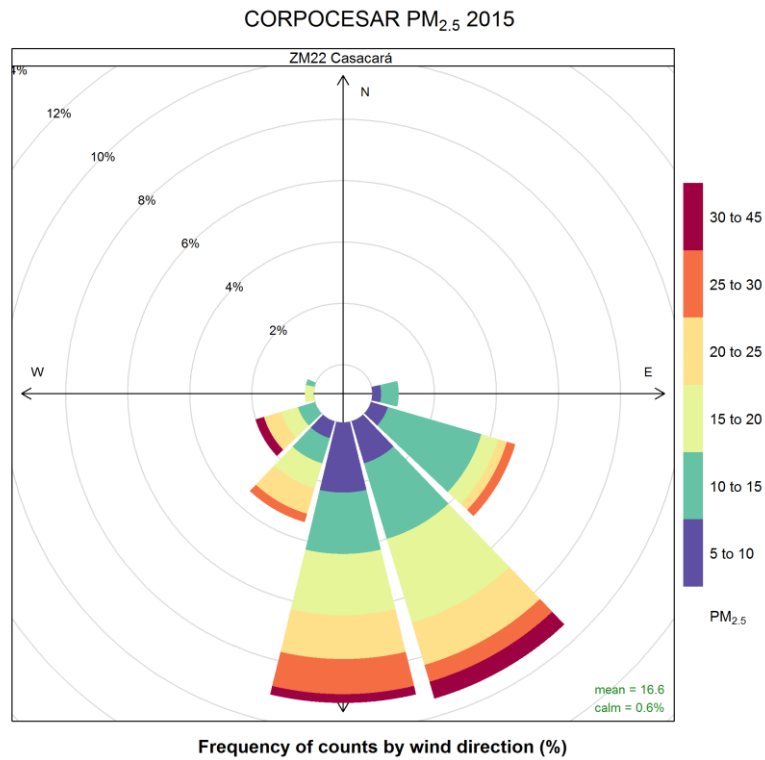


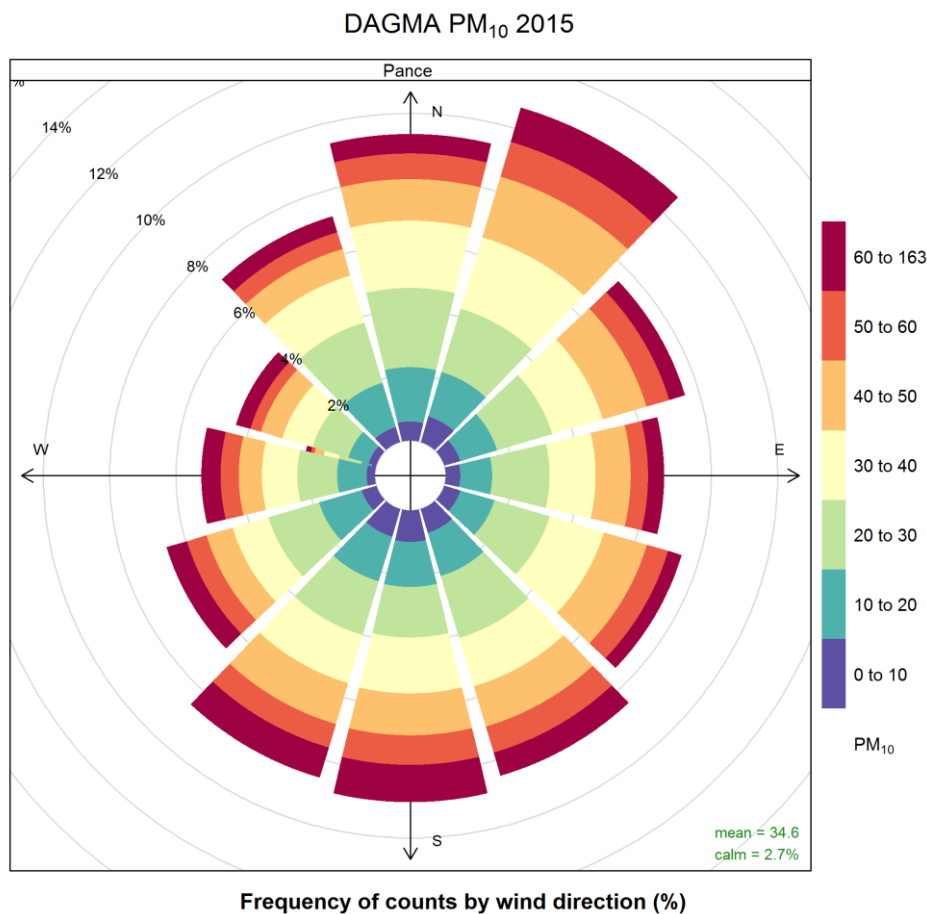
Figura 7-5. Rosa de contaminación de las concentraciones de PM_{2.5} para la estación ZM22 Casacará en 2015. Concentraciones en µg/m³



7.3. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA)

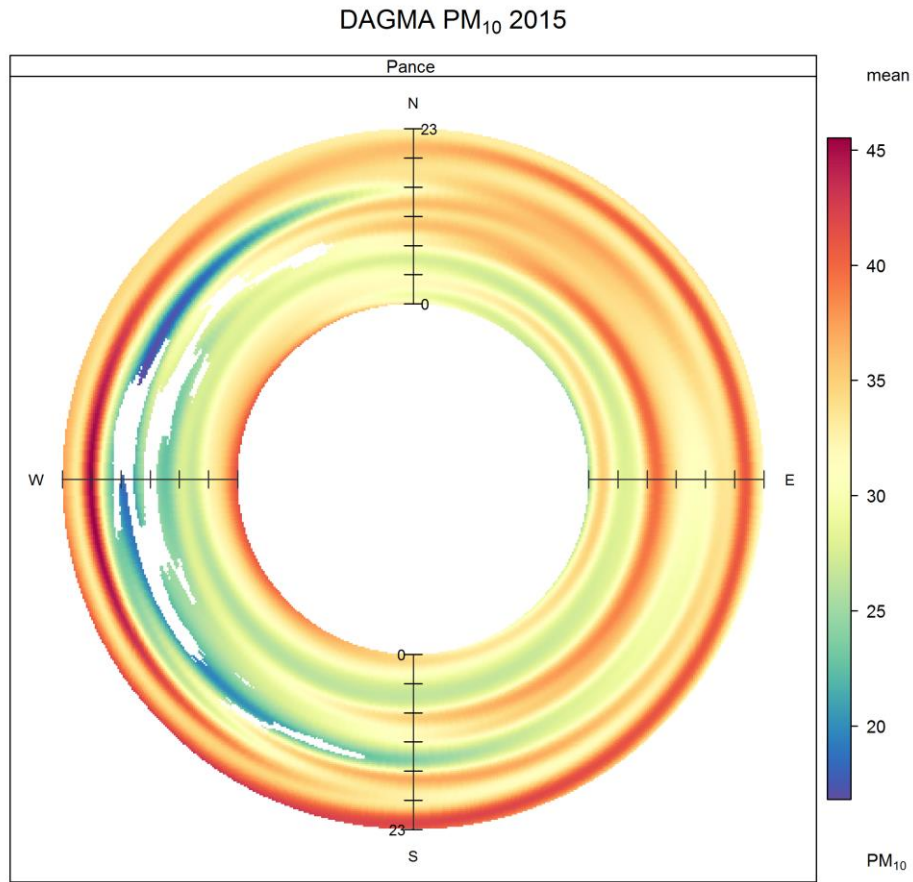
Teniendo en cuenta las condiciones de representatividad temporal de los datos, se toma como caso de análisis la incidencia del parámetro PM_{10} sobre la estación de Pance para el año 2015. La Figura 7-6 presenta la rosa de contaminación y de la cual se observa en general que de prácticamente todas las direcciones (Norte y Sur ligeramente superiores) hay aporte de PM_{10} y en proporciones de concentración relativamente uniformes (similitud de las barras en todas las direcciones) lo cual no permite identificar de manera precisa cual o cuales son los principales focos de emisión que afectan la calidad del aire para este punto en particular. Adicionalmente, de la figura también se puede extraer que aproximadamente más de un 40% de los datos se encuentran en un rango de concentraciones entre 20 y 40 $\mu g/m^3$.

Figura 7-6. Rosa de contaminación de las concentraciones de PM_{10} para la estación Pance de DAGMA en 2015. Concentraciones en $\mu g/m^3$.



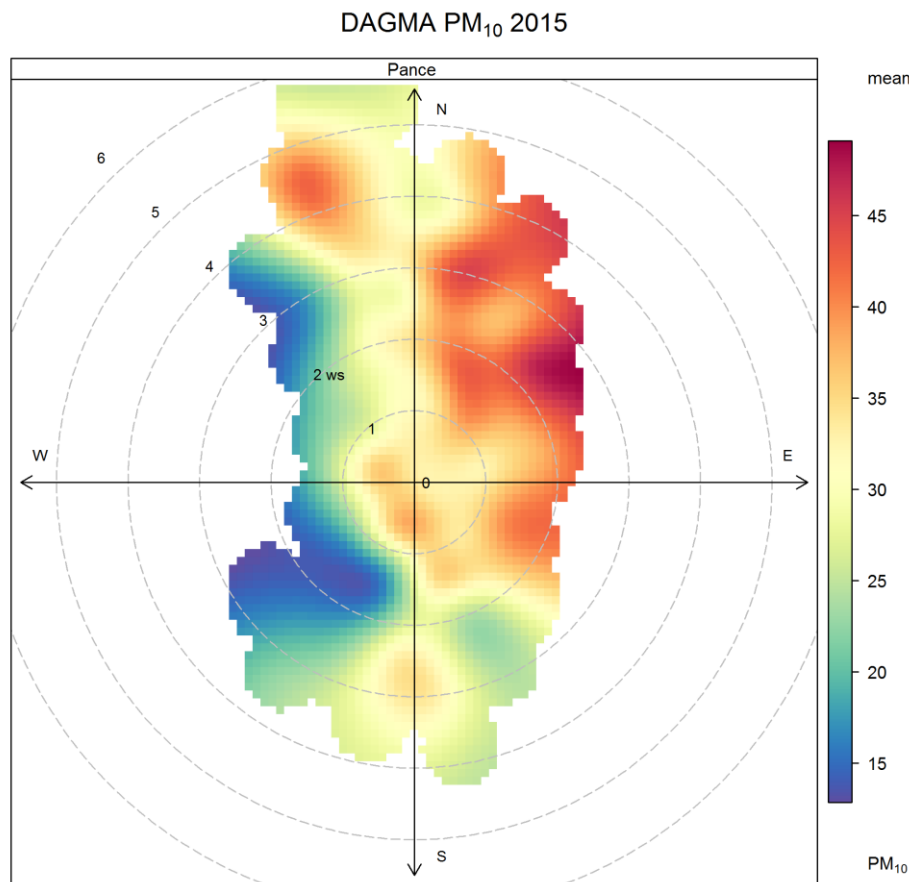
Por otro lado, de la Figura 7-7 si se puede observar que las condiciones de calidad del aire varían a lo largo del día y como es influenciada por la dirección de la que provengan los vientos. Por ejemplo, los vientos provenientes del Oeste, afectan negativamente la calidad del aire en los periodos de la madrugada desde las 00:00 hasta la 1:00 aproximadamente y luego al finalizar el día entre las 19:00 y 21:00 horas; sin embargo, en gran parte del día las condiciones de calidad del aire son buenas (entre 1:00 y las 19:00 horas). Ahora, cuando se analizan las corrientes de viento que provienen del Este, estas afectan la calidad del aire principalmente en los periodos de 8:00 a 12:00 y 20:00 a 23:59.

Figura 7-7. Diagrama polar anular de las concentraciones de PM₁₀ para la estación Pance de DAGMA en 2015. Concentraciones en µg/m³.



Finalmente, en la Figura 7-8 se presenta un diagrama polar suavizado de las concentraciones de PM₁₀ de Pance para el año 2015 el cual relaciona las variables velocidad del viento, dirección del viento y concentración de un contaminante determinado mediante su diagramación en una superficie continua que se calcula a partir de modelación usando técnicas de suavizado lo cual proporciona mayor claridad en la identificación de fuentes de emisión al obtener un perfil continuo. En este caso, la gráfica indica que las mayores concentraciones de PM₁₀ provienen del Noreste con velocidades de viento entre 2 y 4 m/s lo que sugiere que este material particulado no se genera localmente (si se observa la Figura 7-6 se puede ver que la mayor proporción de vientos vienen del Noreste).

Figura 7-8. Diagrama polar que relaciona velocidad del viento, dirección del viento y concentración de PM₁₀ para la estación DAGMA – Pance en 2015. Concentraciones en µg/m³.



7.4. Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA)

Dado que esta autoridad cuenta con alto número de estaciones y gran cantidad de información, se presenta el análisis y los resultados gráficos de varias estaciones simultáneamente para los contaminantes criterio PM₁₀ y PM_{2.5}.

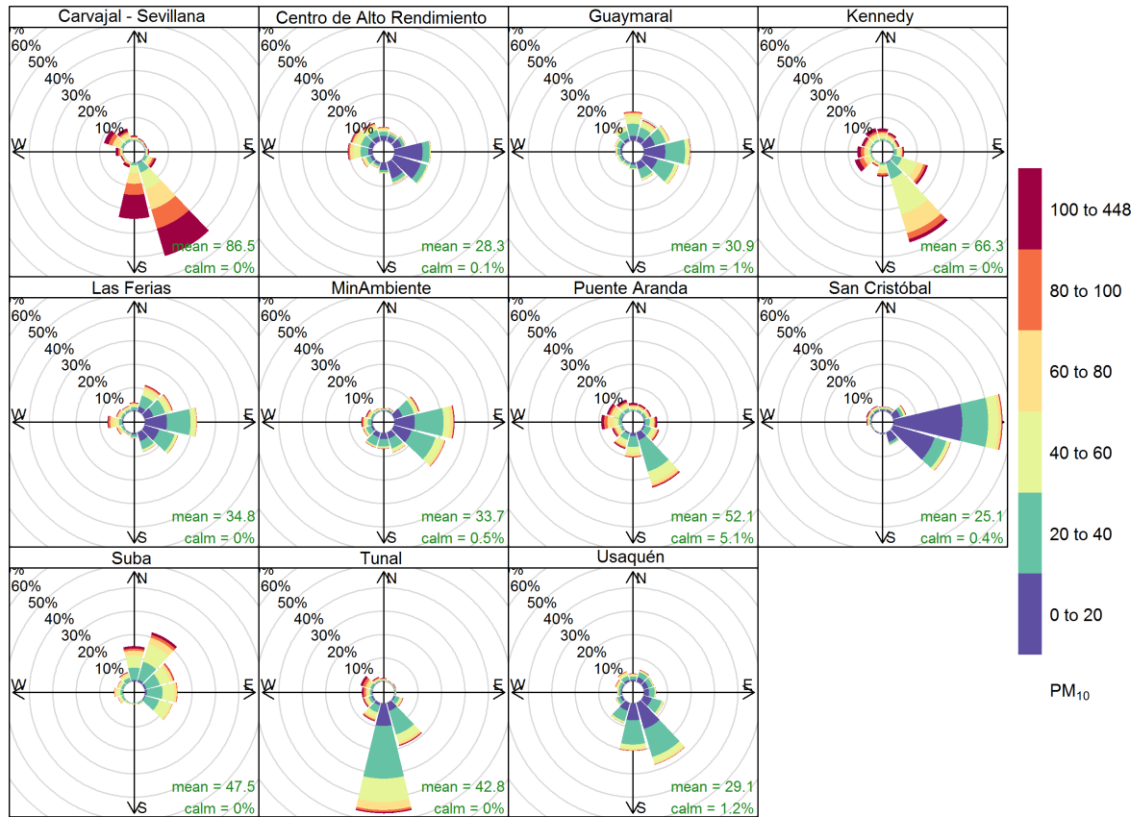
En la Figura 7-9 y la Figura 7-10 se pueden observar los resultados en rosas de contaminación para PM₁₀ y PM_{2.5} (basados en mediciones horarias) respectivamente. La estación Carvajal – Sevillana presenta las mayores concentraciones para ambos contaminantes (lo cual es consistente al ser el PM_{2.5} fracción del PM₁₀) indicando que provienen significativamente del Sureste y que aproximadamente un 20% de los datos reportan concentraciones mayores a 100 µg/m³ para PM₁₀; para PM_{2.5} un 15% aproximadamente de los datos presentan concentraciones mayores a 40 µg/m³.

Estaciones como Kennedy y Puente Aranda presentan mejores condiciones de calidad del aire con porcentajes relativamente bajos de concentraciones superiores a los 100 µg/m³ y de 40 µg/m³ para PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente.

En general, se puede observar que los vientos provenientes del Este (cerros orientales) son los que predominan en prácticamente todas las estaciones (excepto Tunal y de manera parcial Carvajal - Sevillana) y se puede decir que dadas las bajas concentraciones que contribuyen, generan un efecto de mejoramiento de la calidad del aire respecto al punto de monitoreo de cada estación.

Figura 7-9. Rosas de contaminación por PM₁₀ (µg/m³) para varias estaciones de la SDA en 2015 que presentaron representatividad temporal igual o superior a 75%.

SDA PM₁₀ 2015



Frequency of counts by wind direction (%)

Por otra parte, los diagramas polares anulares de la Figura 7-11 y de la Figura 7-12 permiten observar para las mismas estaciones analizadas anteriormente, el comportamiento tanto para PM₁₀ como PM_{2.5} durante un día “promedio”. En Carvajal – sevillana, el periodo entre las 6:00 y 8:00 horas comprende las horas de mayor concentración de estos contaminantes coincidiendo con el periodo de alto tráfico vehicular; al finalizar el día, entre las 20:00 y 23:59 horas, las concentraciones en particular de PM_{2.5} se elevan significativamente con aporte principalmente de vientos provenientes del Oeste y Suroeste que pueden estar asociados a tráfico de vehículos pesados.

Sin embargo, no todas las estaciones presentan comportamientos similares entre las dos fracciones. Por ejemplo, Tunal presenta concentraciones relativamente bajas durante el día para PM₁₀ pero relativamente altas para PM_{2.5}, lo que sugiere que en ese caso una fracción significativa de todo el material particulado es PM_{2.5} el cual es clave en el análisis de cifras de morbilidad y de mortalidad relacionadas con la contaminación atmosférica.

Figura 7-10. Rosas de contaminación por PM_{2.5} (µg/m³) para varias estaciones de la SDA en 2015 que presentaron representatividad temporal superior a 75%.

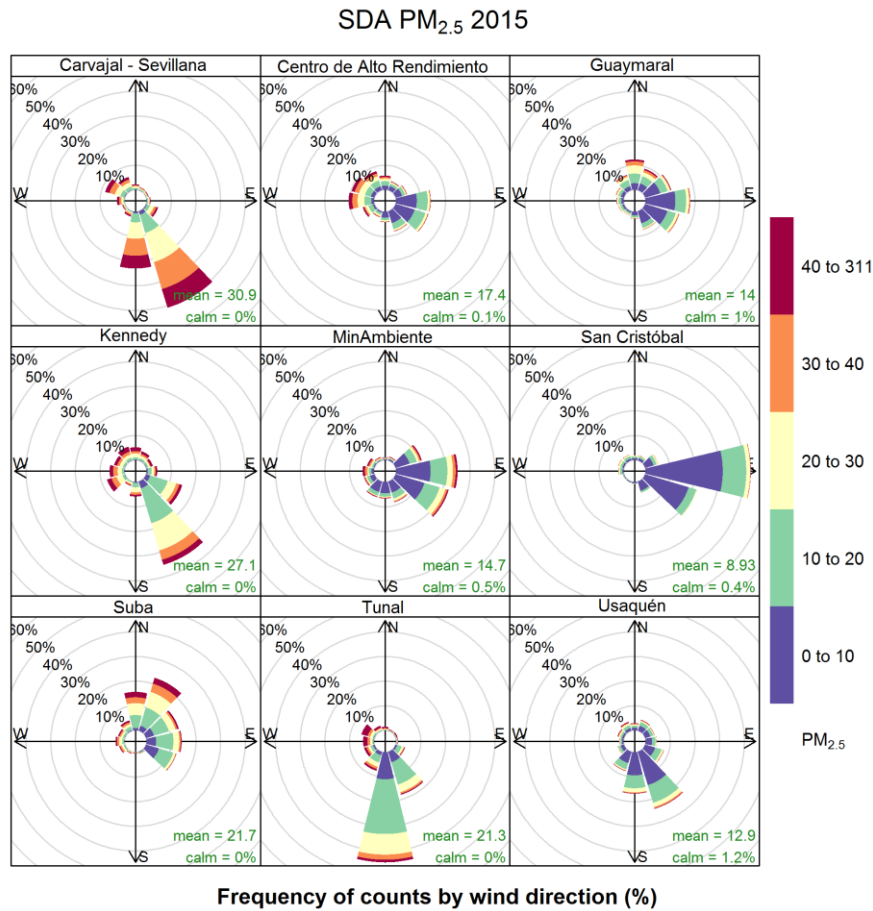


Figura 7-11. Diagramas polares anulares para PM₁₀ (µg/m³) para varias estaciones de la SDA en 2015.

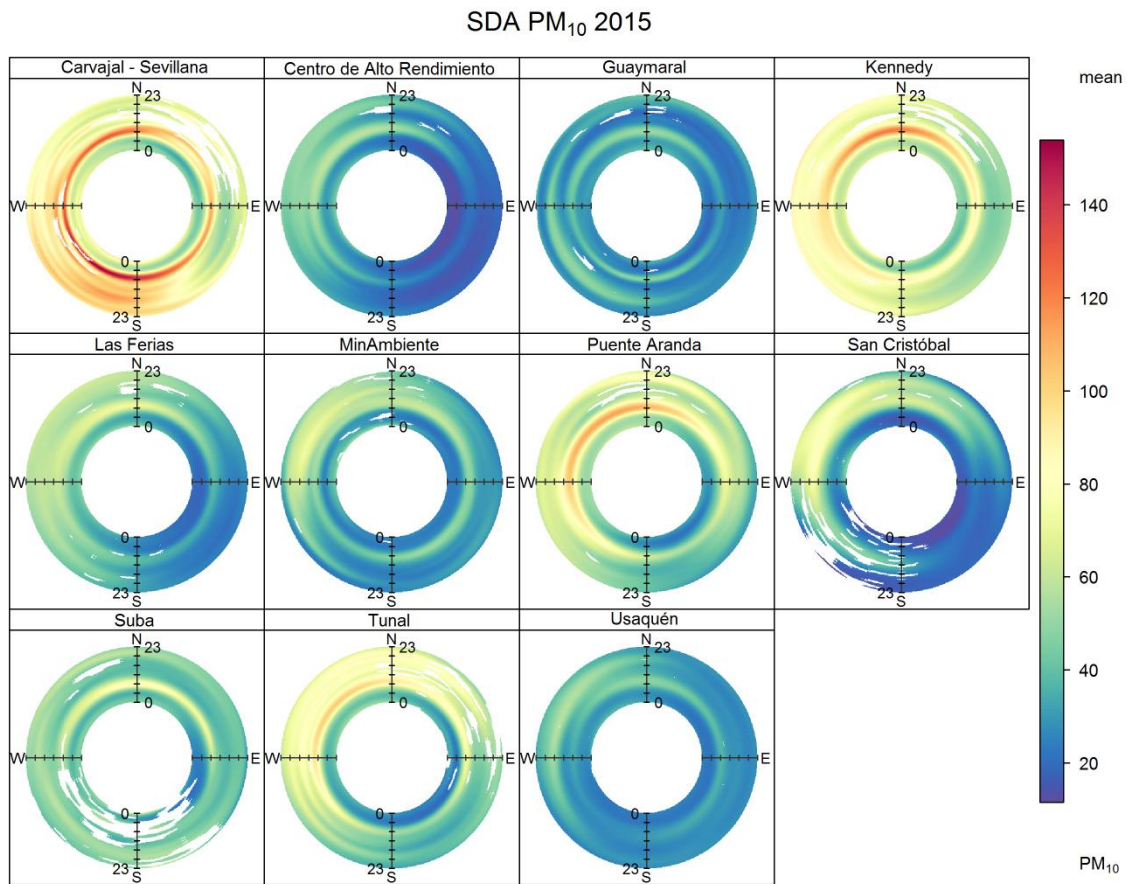
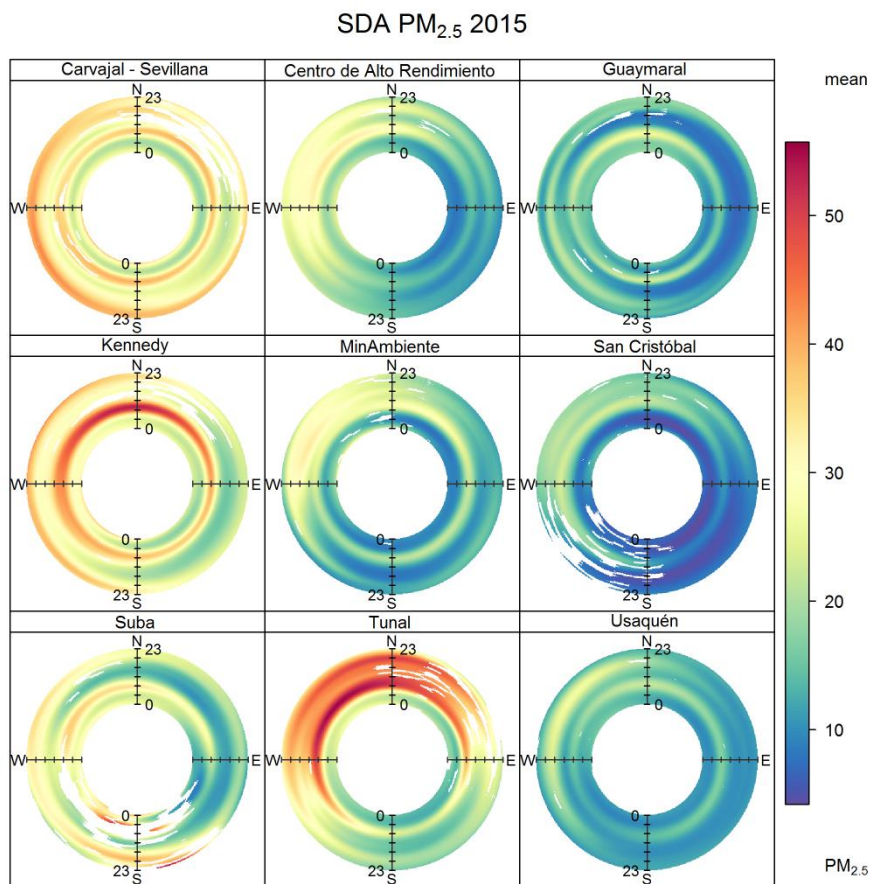


Figura 7-12. Diagramas polares anulares para PM_{2.5} (µg/m³) para varias estaciones de la SDA en 2015.



Para finalizar, se presentan los diagramas polares para los contaminantes criterio analizados hasta ahora. Cuando se comparan la Figura 7-13 y la Figura 7-14 para la estación Carvajal – Sevillana, se puede observar que el PM₁₀ proviene principalmente de vientos del sur con velocidades promedio entre 4 y 6 m/s lo que sugiere que una fracción significativa de este contaminante proviene de fuentes de emisión ubicadas hacia el sur de la estación de monitoreo y como se vio en la Figura 7-11 del alto tráfico vehicular en las horas pico. Sin embargo, para PM_{2.5} el diagrama polar de la Figura 7-14 sugiere que no solo los vientos provenientes del sur sino también los de la dirección Oeste aportan de manera significativa a las concentraciones de este contaminante; más significativo aún, el PM_{2.5} se genera localmente muy posiblemente por las fuentes fijas localizadas en esta zona de alta concentración industrial en la ciudad (procesos de combustión) así como de los vehículos que usan diésel como combustible que transitan en las vías aledañas. Una situación muy similar ocurre con la estación Kennedy para PM_{2.5}; sin embargo, allí la zona ya no es de carácter industrial sino más bien residencial y las concentraciones relativamente altas podrían explicarse principalmente por la influencia de vías de alto tráfico vehicular. El último caso representativo corresponde a la estación Tunal donde las concentraciones de PM_{2.5} no sólo parecen estar altamente influenciadas por las corrientes de viento provenientes del Noroeste sino también por influencia local (aunque en menor grado).

Figura 7-13. Diagramas polares de las concentraciones de PM₁₀ para las estaciones de la SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.

SDA PM₁₀ 2015

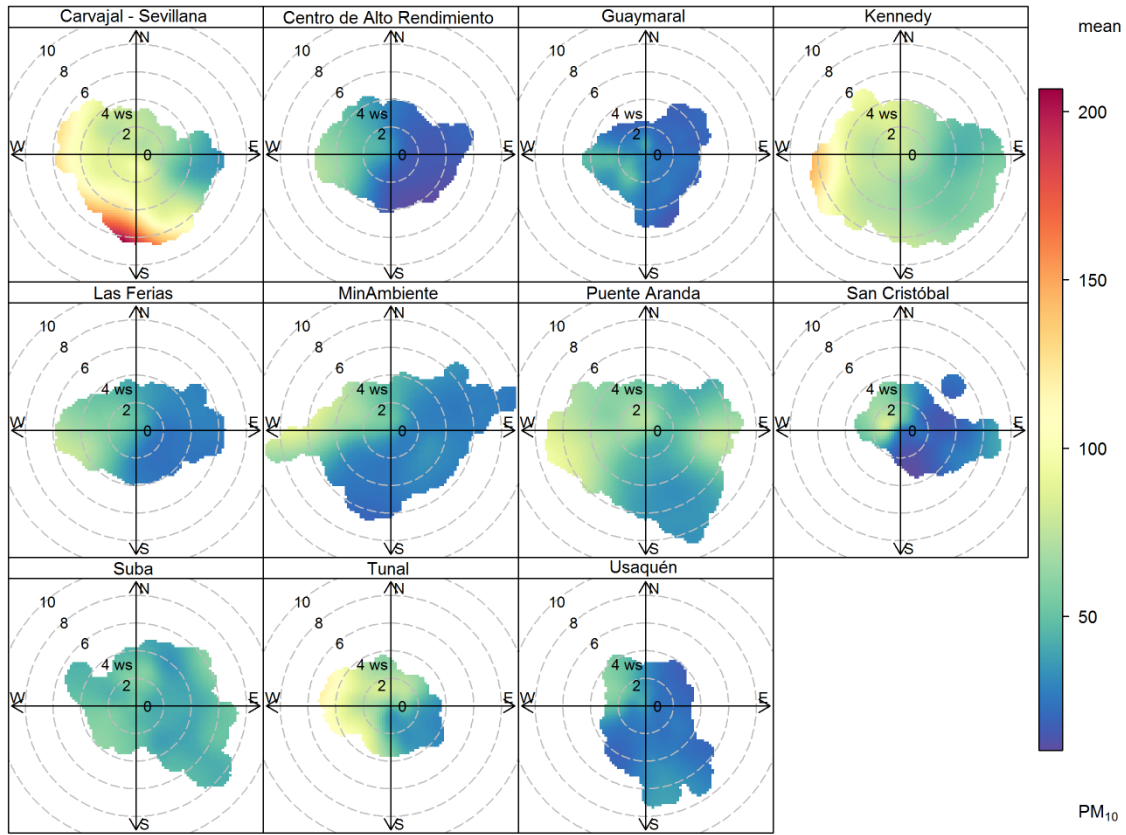
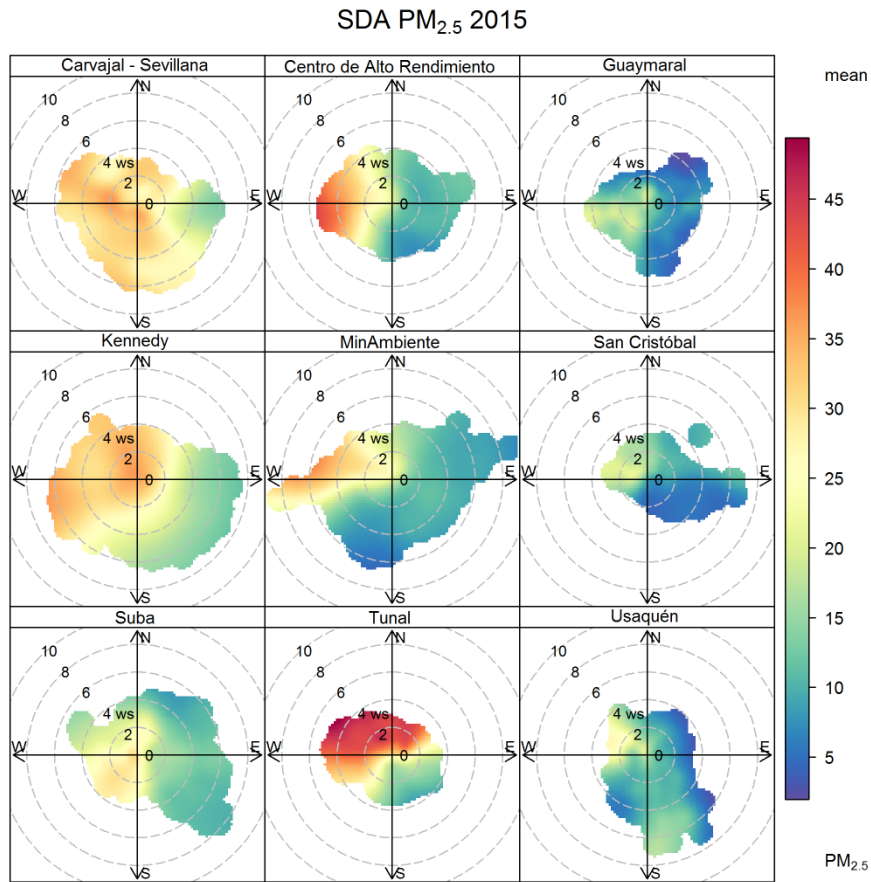


Figura 7-14. Diagramas polares de las concentraciones de PM_{2.5} para las estaciones de la SDA que presentaron una cobertura temporal igual o mayor a 75%.



8. Análisis comparativo de tendencias de contaminación atmosférica e Infecciones Respiratorias Agudas (IRA)

Capítulo elaborado gracias al trabajo conjunto entre el IDEAM y el Ministerio de Salud y Protección Social.

Uno de los objetivos primarios de la medición de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos es determinar sus efectos en la salud de la población. La evaluación del Índice de Calidad del Aire (ICA) que fue expuesta en capítulos anteriores evidenció que, a diferencia de los gases, el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ representa efectos potenciales adversos a la salud, cuyo grado de impacto reflejado en las categorías del ICA variaba en función del tiempo y de las estaciones de monitoreo. Se evidenciaron momentos cuyas concentraciones alcanzaron las categorías “Dañina a la salud para grupos sensibles” y “Dañina a la salud”, lo cual merece especial atención que resulte en esfuerzos focalizados a nivel local para mejorar el estado de la calidad del aire.

El presente capítulo expone los resultados iniciales obtenidos a partir del análisis comparativo del comportamiento de las series de tiempo de concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) y del número de casos atendidos por Infecciones Respiratorias Agudas (IRA). Este es el resultado del trabajo conjunto que se ha venido desarrollando entre la Subdirección de Salud Ambiental y la Dirección de Epidemiología y Demografía del Ministerio de Salud y Protección Social (MSPS) y la Subdirección de Estudios Ambientales del IDEAM. Este trabajo conjunto inició en agosto de 2016 y se espera su continuidad a futuro.

Las fuentes de información de número de personas atendidas por IRA fueron proporcionadas por el MSPS mediante la base de datos del registro individual de prestación de servicios en salud que se encuentran dispuestos en el Sistema Integral de Información de la Protección Social (SISPRO), mientras que la información de calidad del aire, particularmente $PM_{2.5}$ y PM_{10} , está disponible en el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire – SISAIRE. Teniendo en cuenta que, para el caso del presente análisis, los efectos en la salud por altas concentraciones de material particulado se evidencian aproximadamente dos semanas después de la ocurrencia de un evento de alta contaminación atmosférica, se retrocedieron temporalmente las series de IRA en 14 días de manera que se pudiera observar el comportamiento de los eventos en salud y de los datos de calidad del aire de manera directa. El periodo de análisis correspondió a los años 2011 a 2015 teniendo en consideración datos diarios.

La evaluación comparativa de las series de número de personas atendidas por IRA y de calidad del aire se realizó mediante el ambiente de programación R (R Core Team, 2016), específicamente usando las funciones del paquete *Openair* (Carslaw & Ropkins, 2012; Carslaw D. C., 2015) el cual permite la obtención de ciclos temporales para cada año. Mediante el uso de esta herramienta, la evaluación se centró principalmente en la comparación de las medianas por mes de concentraciones de contaminantes y del número de personas atendidas por IRA en municipios que fueron seleccionados de acuerdo con su nivel de oferta de información.

Es importante destacar que los resultados presentados en este capítulo corresponden a una aproximación inicial entre las variables estudiadas. Por tanto, los análisis que se exponen son exploratorios, es decir, no son concluyentes ni definitivos. Se planea para el futuro trabajo entre el MSPS y el IDEAM tener en cuenta la información correspondiente a las variables meteorológicas y desarrollar un modelo matemático que permita reducir la influencia de variables distractoras en los análisis de correlación. Una vez se logre este avance, es posible que las conclusiones derivadas de la aproximación inicial cambien debido al aumento de la certeza sobre el comportamiento de los datos.

8.1. Contextualización

8.1.1. Impacto del medio ambiente en la salud

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, el 23% de las muertes a nivel mundial están relacionadas con causas medioambientales (esto representa unas 12,6 millones de muertes al año, de las cuales menos de un millón se reportaron en toda América), (Organización Mundial de la Salud, 2016). De los resultados

presentados por la OMS, se puede concluir que aproximadamente 2 millones de muertes son atribuibles a la contaminación del aire intra y extra mural. Las infecciones respiratorias que incluyen neumonía, bronquitis y bronquiolitis causan 935 mil muertes al año (2013). Estas infecciones son la causa principal de mortalidad en niños menores de 5 años registrando un 18%.

8.1.2. Efectos del material particulado en la salud

Los efectos a la salud de material particulado tanto en tiempos de exposición cortos como prolongados incluyen:

- Aumento en los índices de morbilidad respiratoria y cardiovascular, por ejemplo, severidad de asma, de síntomas respiratorios e incremento en ingresos hospitalarios.
- Aumento en los índices de mortalidad por enfermedades respiratorias y cardiovasculares y cáncer de pulmón.

Hay evidencia sólida sobre los efectos a tiempos de exposición corto para PM_{10} sobre las vías respiratorias, sin embargo, para mortalidad, el $PM_{2.5}$ es el principal factor de riesgo especialmente a exposiciones prolongadas. Se estima que los índices de mortalidad diaria van a aumentar entre 0,2 y 0,6% por cada $10\mu g/m^3$ de PM_{10} (WHO, 2006; Samoli, et al., 2008). Respecto a exposición prolongada a $PM_{2.5}$, se considera un aumento en los índices de mortalidad cardiopulmonar entre 6-13% por cada $10\mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$ (Krewski, et al., 2009; Pope III, et al., 2002).

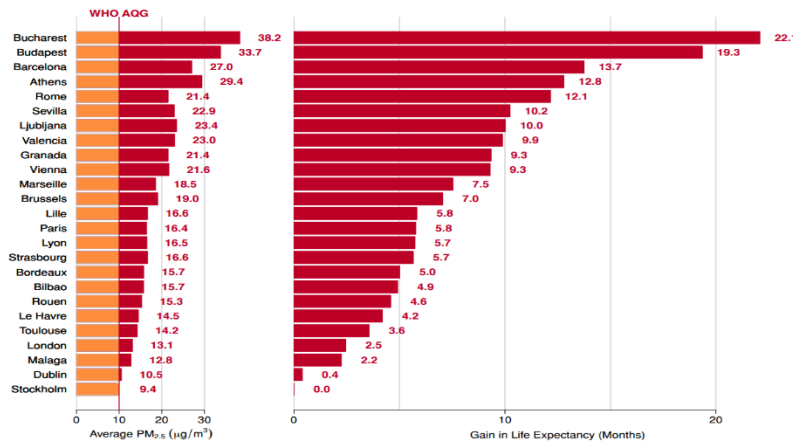
Las poblaciones más susceptibles involucran a los niños, personas de la tercera edad y quienes sufren enfermedades cardíacas o pulmonares. Por ejemplo, la exposición a material particulado afecta el desarrollo pulmonar en los niños y ejerce efectos en la tasa de crecimiento y funcionamiento a largo plazo (World Health Organization - Regional Office for Europe, 2011). Cabe resaltar que no hay evidencia de niveles de exposición mínimos que no tengan efectos adversos a la salud, además, la exposición es inevitable otorgándole un papel determinante en la salud pública.

Por otra parte, el contaminante denominado “*black carbón*” resultante de la combustión incompleta y que es fracción del $PM_{2.5}$, ha ganado relevancia en el análisis de calidad del aire debido a que existe evidencia de sus efectos negativos tanto en salud como a nivel climático ya que contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos (conocidos por sus propiedades carcinogénicas y tóxicas) así como metales y sales inorgánicas.

8.1.3. Morbilidad y mortalidad asociada a la exposición a material particulado

Se estima que aproximadamente 3% de las muertes por causas cardiopulmonares y 5% de las muertes por cáncer de pulmón son atribuibles al material particulado (Cohen, et al., 2004). Adicionalmente, la exposición a $PM_{2.5}$ reduce la esperanza de vida en promedio 8,6 meses de acuerdo con estudios realizados por APHEKOM (Organización dedicada a la investigación y estudio de calidad del aire en Europa) (World Health Organization, 2013). A nivel mundial se pueden revisar casos de estudio que han demostrado cómo la disminución de los niveles de $PM_{2.5}$ a largo plazo, aumenta la esperanza de vida de la población. La Figura 8-1 resume parte del estudio de APHEKOM con respecto a la incidencia de la reducción de los niveles de $PM_{2.5}$ en la esperanza de vida en importantes centros urbanos de Europa.

Figura 8-1. Ganancia promedio en esperanza de vida (meses) para personas mayores de 30 años debido a una disminución anual promedio en 10 µg/m³ para PM_{2.5}. Fuente: APHEKOM, <http://www.endseurope.com/docs/110302b.pdf>.



Las siguientes secciones de este capítulo están destinadas a la presentación de los resultados gráficos para cada uno de los municipios analizados. Con el objetivo de lograr una comparación de las series en un mismo plano, todos los datos fueron normalizados mediante su división entre el promedio de su respectiva serie anual de manera que aquellos registros con valor de 1,0 implican correspondencia con el promedio mientras que valores superiores o inferiores son más altos o más bajos, respectivamente.

8.2. AMVA (Medellín)

En este análisis solamente se consideró la información de número de personas atendidas por IRA en la ciudad de Medellín, así como las estaciones ubicadas dentro del perímetro de la ciudad. Si bien la evaluación de tendencias puede llevarse a cabo para todos los municipios del Valle de Aburrá al tiempo, se optó únicamente por esta ciudad con el objetivo de reducir posibles sesgos por cubrir un área más extensa.

La Figura 8-2 y la Figura 8-3 presentan la evolución entre 2011 y 2015 del número de personas atendidas por IRA en comparación con las concentraciones de PM_{2.5} y de PM₁₀, respectivamente.

Figura 8-2. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM_{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Medellín.

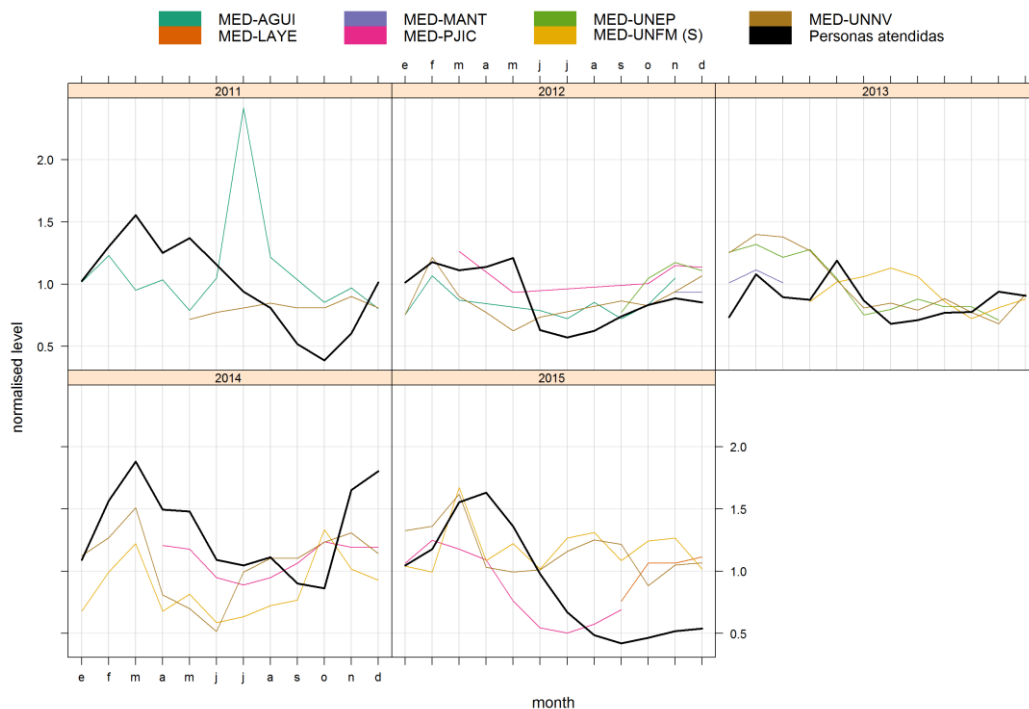
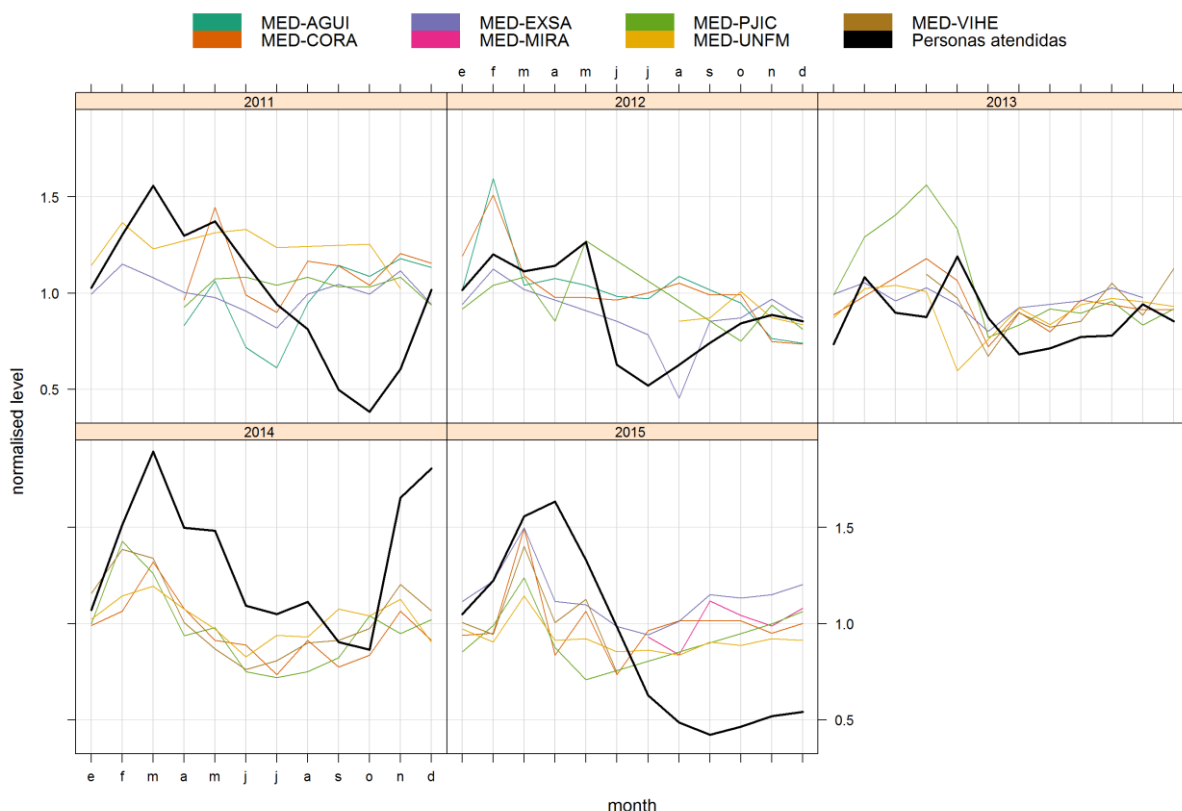


Figura 8-3. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de concentraciones diarias de PM₁₀ y de número de casos atendidos por IRA (en negro) para la ciudad de Medellín.



Las tendencias indican en general una correspondencia en los primeros meses de cada año donde mayores concentraciones de material particulado implican un aumento en el número de personas atendidas por IRA. Posteriormente, en los meses centrales del año, el número de personas atendidas disminuye conforme bajan las concentraciones de estos contaminantes. Para los últimos meses el número de casos atendidos vuelve a aumentar al ser más altas las concentraciones.

Las excepciones del anterior análisis se encuentran en el año 2011 para PM_{2.5} para el cual no se observa un comportamiento claro y en los últimos meses del año 2015 para ambos contaminantes donde se observa que, a pesar de que aumentan las concentraciones, el número de casos atendidos no varía significativamente teniendo en cuenta la tendencia de los otros años; una posible explicación a este comportamiento puede atribuirse a la fuerte influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur, que contribuyó a la disminución de la precipitación, lo cual pudo haber reducido el potencial de aparición de casos de IRA.

8.3. CAM (Neiva)

La Figura 8-4 y la Figura 8-5 presentan el análisis comparativo para la ciudad de Neiva. Para el caso del PM_{2.5} los datos disponibles muestran una coincidencia de tendencias con el número de personas atendidas por IRA. Esto es especialmente notorio para los meses de enero a marzo de la estación CAM Norte en 2013.

En el caso del PM₁₀ las tendencias no son totalmente claras. Como casos particulares se observa coincidencia en las tendencias para CAM Norte en 2014 y CORHUILA en 2015. Es posible que los comportamientos no evidentes sean explicados por otras variables que influyen en las IRA, tales como la precipitación, humedad relativa y temperatura o factores biológicos, antecedentes personales de los individuos y/o comorbilidades.

Figura 8-4. Evolución temporal entre 2011 y 2013 de las medianas de las concentraciones diarias de PM_{2.5} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Neiva.

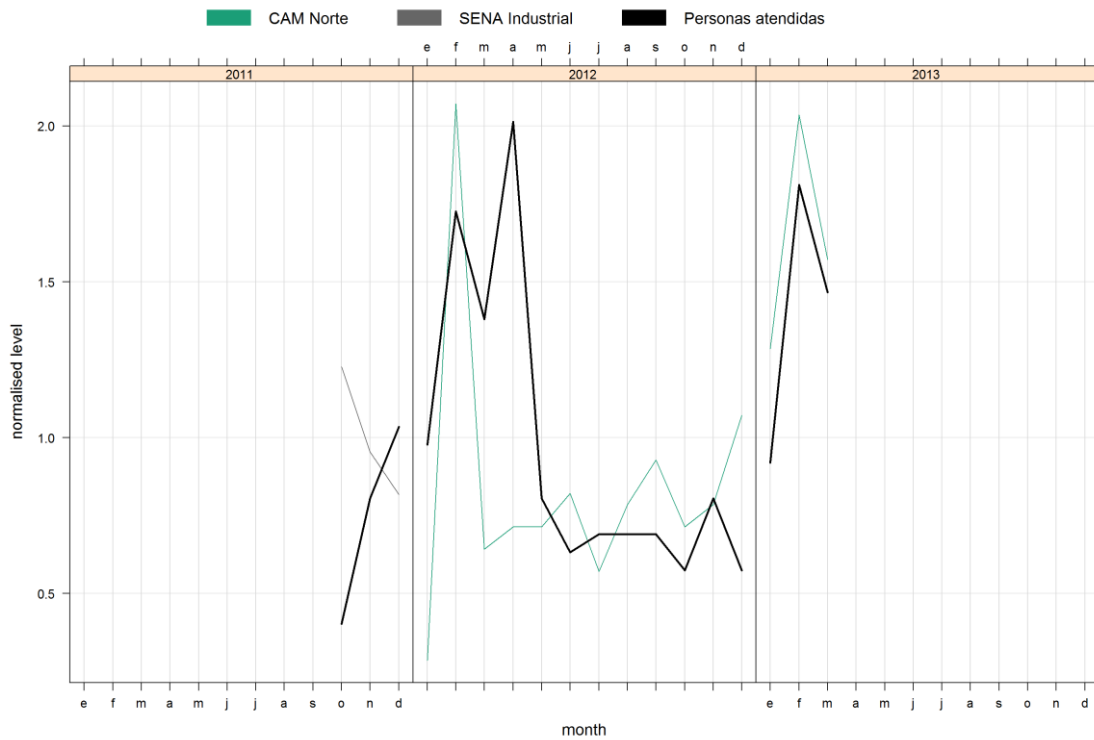
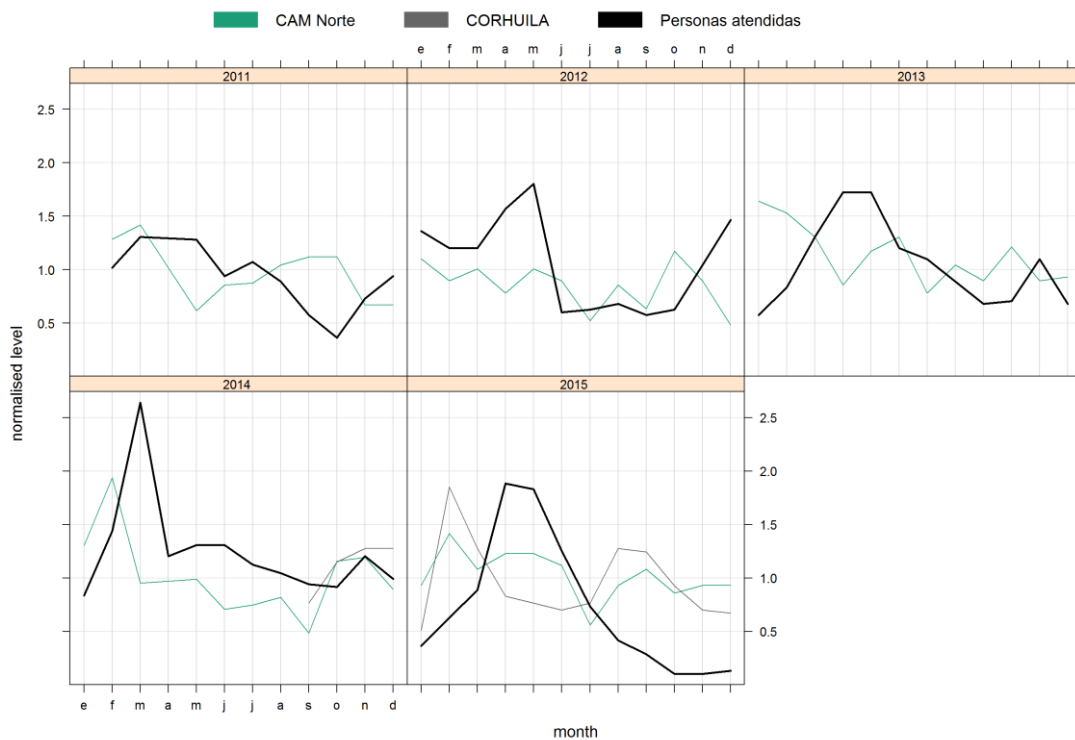


Figura 8-5. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Neiva.

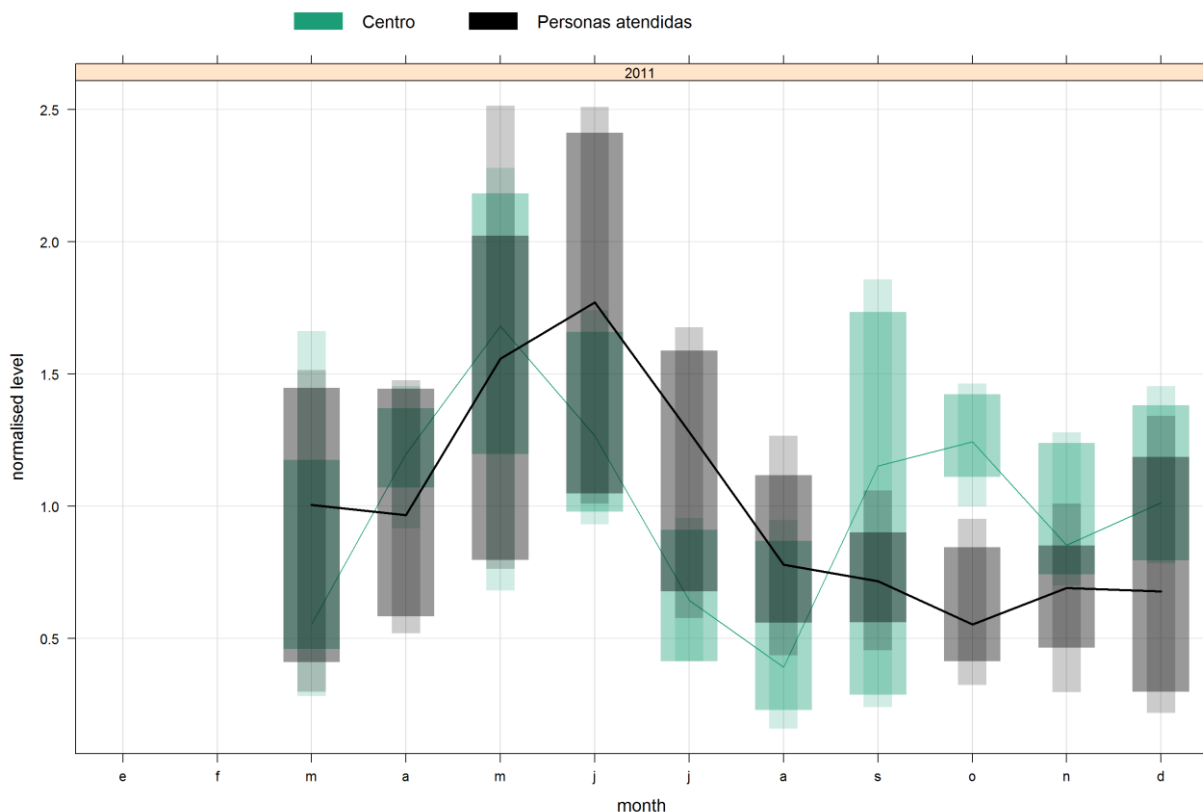


En el caso de la Figura 8-5 nuevamente se observa un menor número de casos atendidos en los últimos meses de 2015, en comparación con años anteriores, tal como se evidenció para la ciudad de Medellín.

8.4. CDMB (Bucaramanga)

La Figura 8-6 y la Figura 8-7 presentan el análisis comparativo de $PM_{2.5}$ y de PM_{10} con número de personas atendidas por IRA. Para el caso del primer contaminante se aprovecha el hecho de que solamente existen dos series para comparación de manera que es posible representar para cada una los cuantiles 5/95 y 25/75 sin llegar a opacar la tendencia. Para la Figura 8-6 se observa un comportamiento coincidente entre ambas variables, especialmente para los meses de marzo a agosto. Sin embargo, el grado de similitud disminuye para los últimos meses del año.

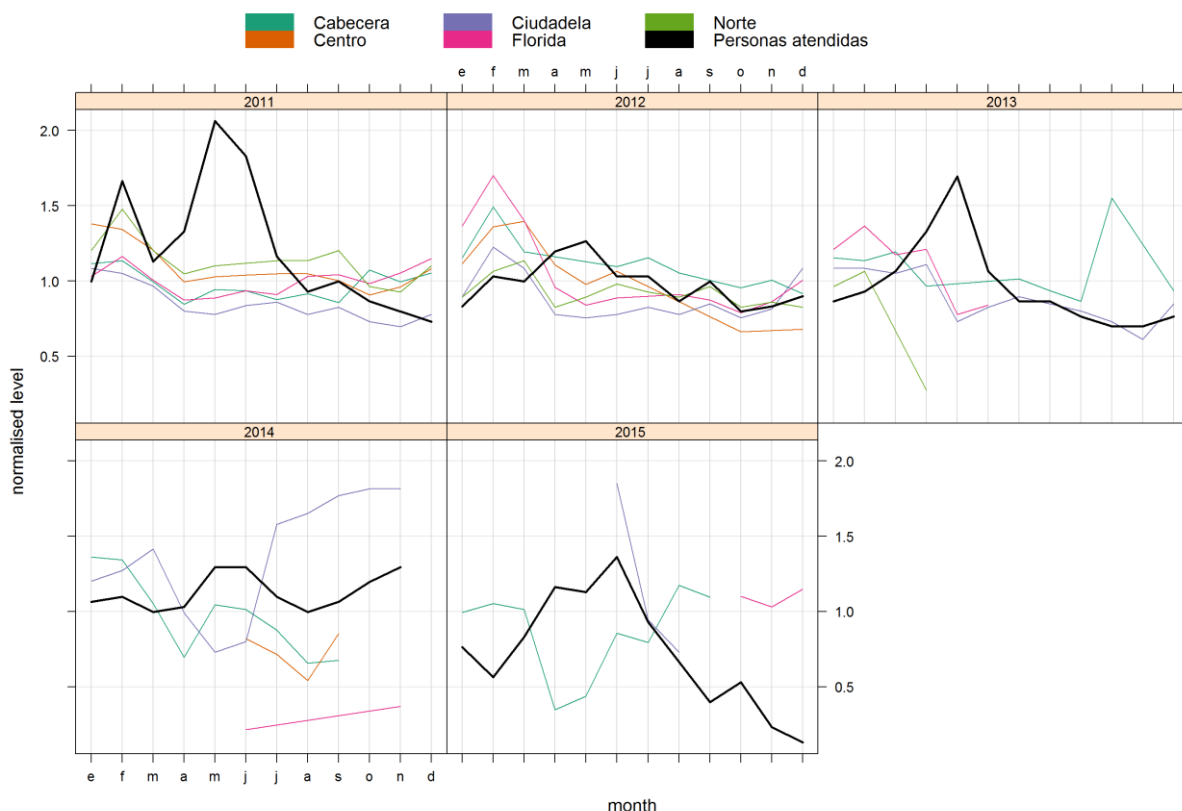
Figura 8-6. Evolución temporal en 2011 de las medianas de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bucaramanga. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (Centro y Personas Atendidas).



Para el caso de PM_{10} se observan tendencias para el año 2012 en todas las estaciones y para 2014 en la Estación Cabecera, en las cuales hay cierta coincidencia en aumentos y disminuciones en las series anuales. Es importante mencionar que Cabecera se encuentra ubicada en un corredor vial y, por tanto, está expuesta directamente a las emisiones vehiculares.

De forma similar a los casos de AMVA y CAM, se observa una reducción notable del número de personas atendidas por IRA en el año 2015.

Figura 8-7. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bucaramanga.



8.5. CORPONARIÑO (Pasto)

En el caso de la ciudad de Pasto, la Figura 8-8 y la Figura 8-9 presentan las tendencias de PM_{2.5} y de PM₁₀ con sus respectivos cuantiles 5/95 y 25/75, cuya representación fue posible debido a que para cada figura solamente hay dos series anuales. El análisis comparativo muestra tendencias similares entre las concentraciones de ambos contaminantes y el número de personas atendidas por IRA, para todos los años hasta 2014. Para los meses de enero y febrero de 2015, el cuantil 95 de PM_{2.5} en IDSN es notablemente alto, lo que corresponde a eventos singulares de alta concentración; el caso del primer mes se debió al uso de pólvora durante las celebraciones de año nuevo.

Nuevamente se observa disminución en el número de casos de personas atendidas para los últimos meses del año 2015 para PM_{2.5} y PM₁₀, tendencia que se ha evidenciado para todas las ciudades analizadas.

Figura 8-8. Evolución temporal entre 2013 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Pasto. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (IDSN y Personas Atendidas).

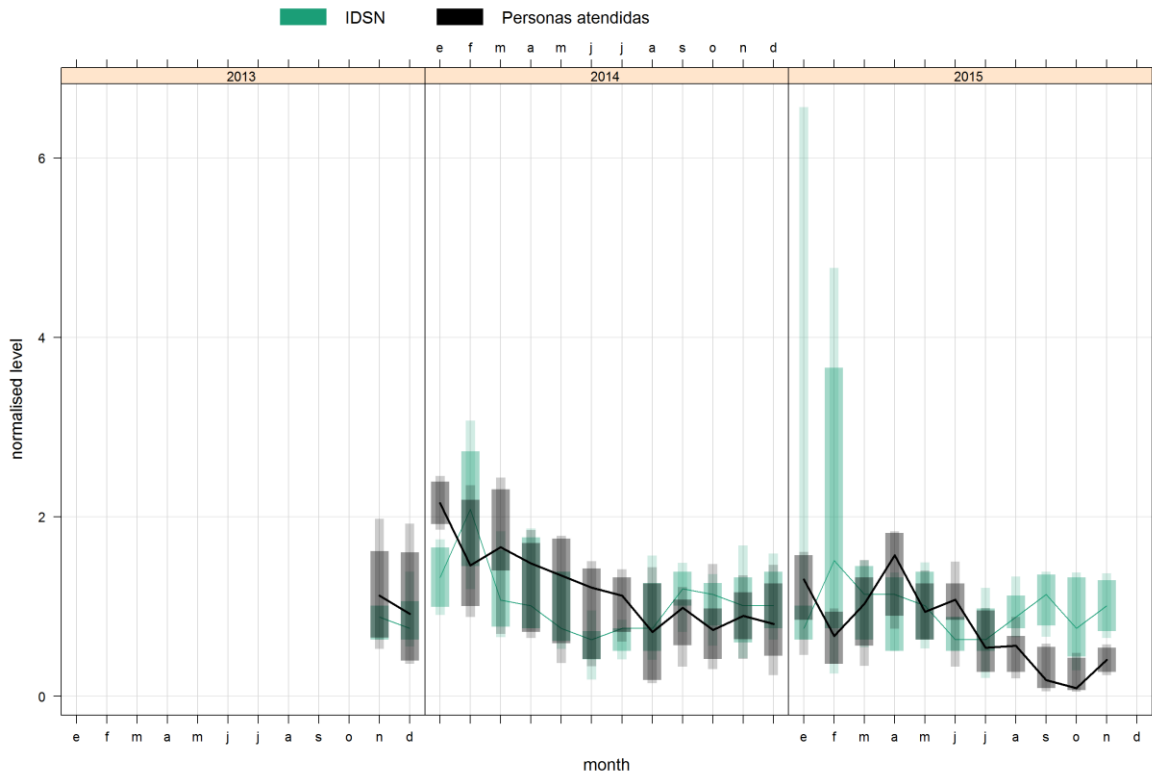
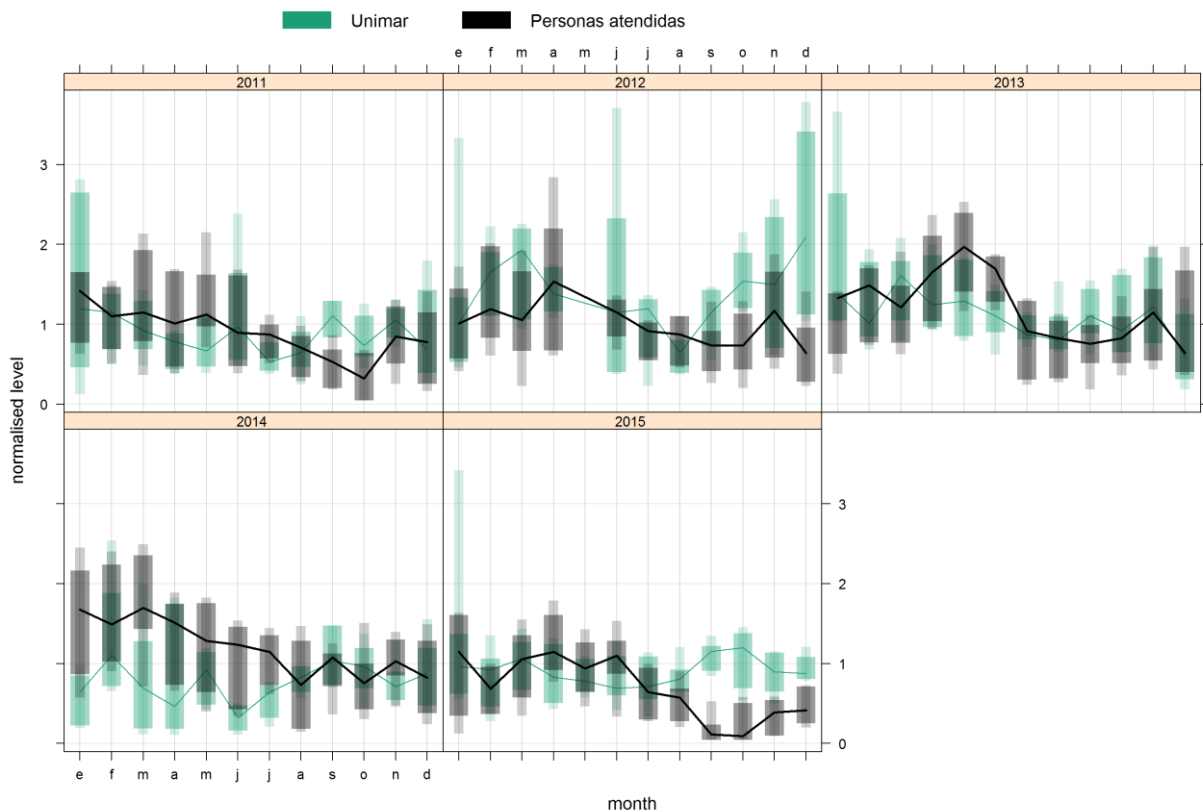


Figura 8-9. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM_{10} y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Pasto. Se presentan además los cuantiles 5/95 y 25/75 para ambas series (Unimar y Personas Atendidas).



8.6. SDA (Bogotá)

Las tendencias para la ciudad de Bogotá se presentan en la Figura 8-10 y en la Figura 8-11, para $PM_{2.5}$ y PM_{10} , respectivamente. Entre 2011 y 2014 en ambos contaminantes se observa una relación, lo que sugiere que el material particulado tiene una influencia destacable en la variación de los casos de IRA. Para el caso de $PM_{2.5}$ solamente se contaba con datos válidos de la estación Kennedy entre 2011 y 2013. A partir del año 2014 entraron nuevos equipos a operar en otras estaciones de manera que se aumentó la cobertura espacial de la medición.

Se observa que el mayor número de personas atendidas por IRA ocurre durante los primeros cinco meses del año, momento a partir del cual disminuye al igual que las concentraciones de material particulado. En algunos casos la tendencia de final de año es concordante y muestra un aumento simultáneo de los casos de IRA y de los niveles de contaminación.

En concordancia con lo discutido previamente, se observa una excepción en la tendencia de los casos de IRA para los últimos meses del año 2015. Es posible que la causa de disminución del número de personas atendidas se deba a condiciones meteorológicas o de variabilidad climática teniendo en cuenta que en dicha época se manifestó el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.

Figura 8-10. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de $PM_{2.5}$ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bogotá. Hasta el año 2013 solamente se contaba con datos válidos de $PM_{2.5}$ para la estación Kennedy.

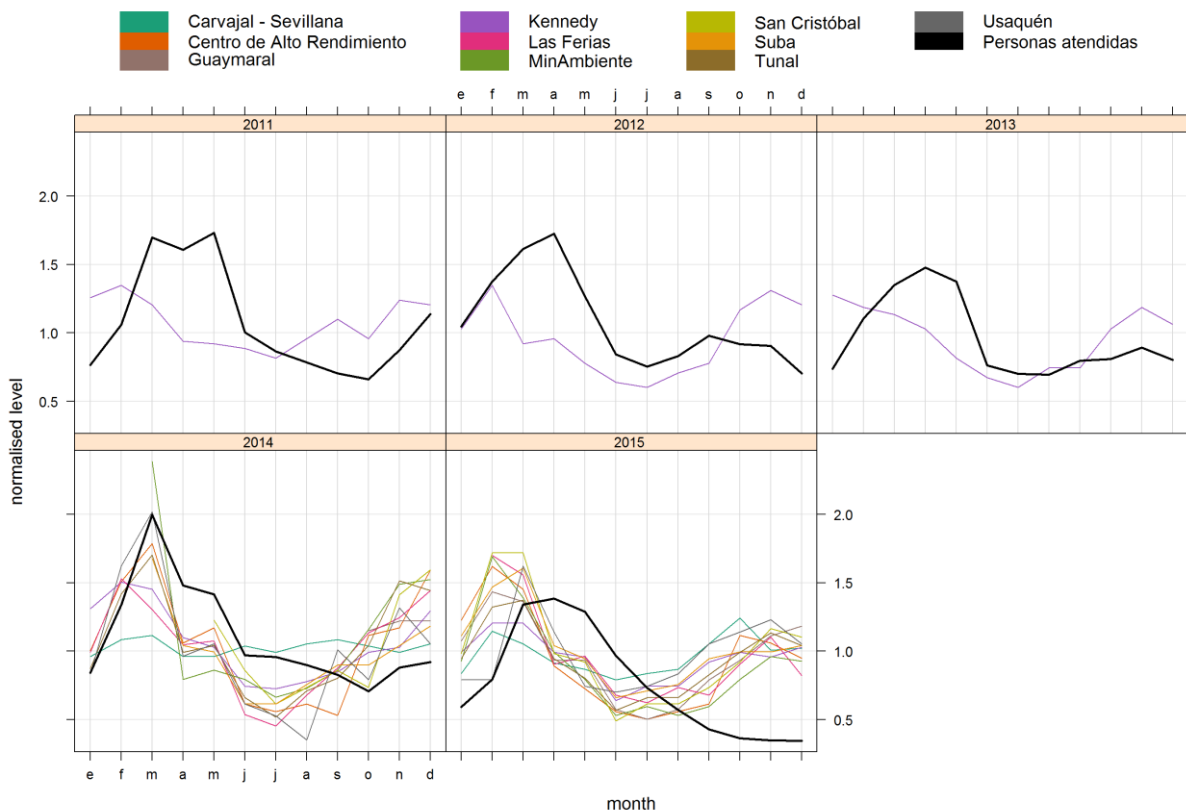
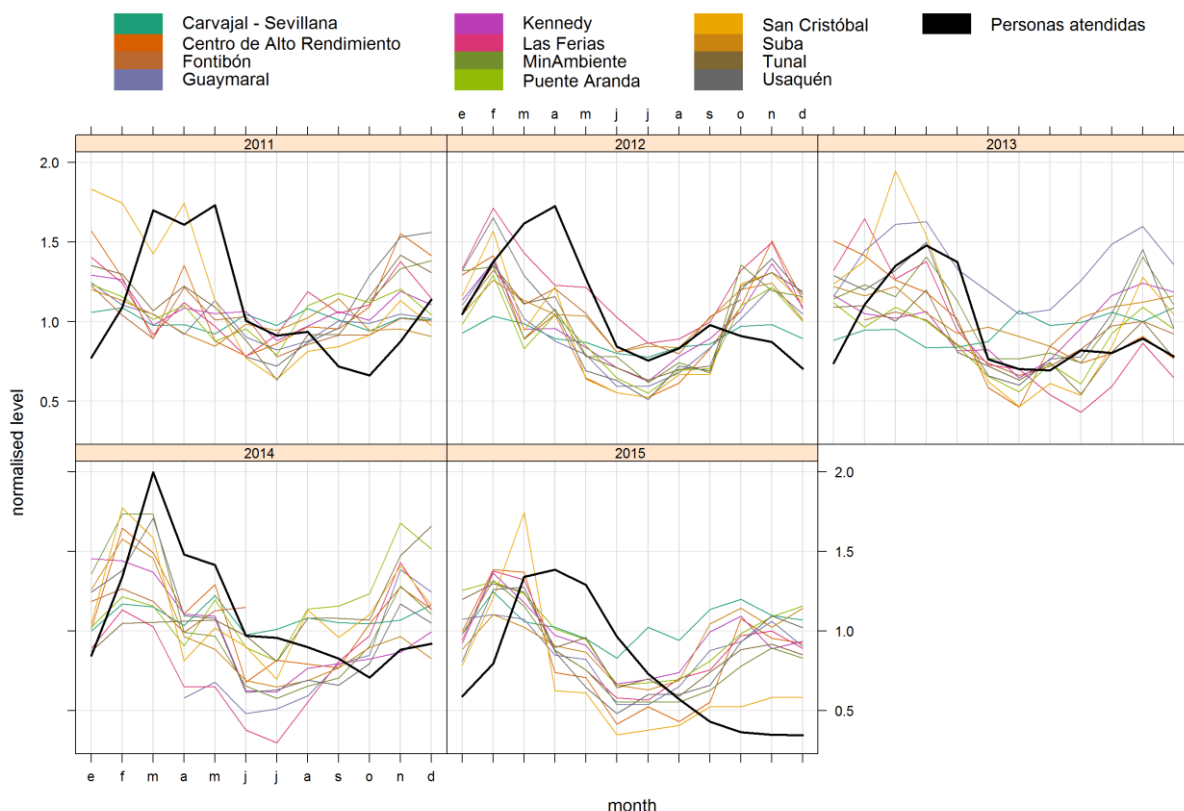


Figura 8-11. Evolución temporal entre 2011 y 2015 de las medianas de las concentraciones diarias de PM₁₀ y de número de personas atendidas por IRA (en negro) para la ciudad de Bogotá.



8.7. Conclusiones

El análisis comparativo de las tendencias de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, y de número de personas atendidas por IRA sugiere, en general, la influencia de la contaminación atmosférica en la ocurrencia de efectos adversos a la salud de la población. Los resultados más evidentes se observaron para las ciudades más pobladas (Bogotá y Medellín) donde la oferta de información contribuye a disminuir las incertidumbres en los análisis permitiendo evidenciar tendencias más generalizadas.

Como se discutió en las secciones previas, en todas las ciudades consideradas se observa una disminución notable del número de personas atendidas por IRA en los últimos meses de 2015, lo cual no coincide con las respectivas tendencias de material particulado y sugiere la influencia de otras variables en la ocurrencia de este comportamiento. Es posible que la disminución de las precipitaciones por el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en 2015 haya contribuido a esta tendencia.

Finalmente, se reitera que esta es una aproximación inicial al análisis de la relación entre contaminación atmosférica y efectos en la salud. A futuro se espera obtener resultados más precisos según los avances logrados en el trabajo conjunto entre el IDEAM y el MSPS y, por tanto, las observaciones plasmadas en este capítulo no son definitivas y pueden cambiar a medida que se profundice en el análisis.

9. Conclusiones y perspectivas

Entre los años 2011 y 2015 operaron veintiún Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en Colombia, los cuales totalizaron 163 estaciones de diferentes tipologías en el último año, incluyendo aquellas destinadas a campañas de monitoreo. Se monitorearon los contaminantes criterio regulados por la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Entre éstos se encuentran las partículas suspendidas totales (PST), el material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2) y el material particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2.5}$). Este es el primer reporte nacional que incluye las tendencias de este último contaminante teniendo en cuenta que su monitoreo se ha incrementado dados sus potenciales efectos adversos a la salud de la población. En el presente documento se analizó un mayor número de SVCA en comparación con el informe del periodo 2007 – 2010.

Las tecnologías de medición de los contaminantes atmosféricos y la complejidad de los diferentes SVCA, en cuanto a su logística de funcionamiento y el número de parámetros monitoreados, muestran una alta heterogeneidad y dificultan la intercomparabilidad, ya sea por parámetro o por año, de los resultados a nivel nacional. En general, en Colombia predominan las estaciones manuales cuyas características permiten obtener máximo un dato por día; sin embargo, con el transcurrir de los años se está dando paso a las estaciones automáticas que tienen una resolución horaria y permiten visualizar con mayor detalle la contaminación atmosférica en sus áreas de influencia. A 2015, este tipo de tecnología estaba confinado principalmente a las grandes ciudades donde la densidad de población es elevada y hay un alto número de actividades responsables de emisiones por fuentes fijas, móviles y de área que repercuten en el deterioro de la calidad del aire.

Es importante destacar que no todos los SVCA realizan un monitoreo continuo ya que depende de las características de las jurisdicciones de sus respectivas autoridades ambientales; entre estas se encuentran el número de habitantes y la presencia o no de actividades específicas asociadas a problemáticas ambientales en calidad del aire. Este es el caso de las campañas realizadas por CORNARE y CORANTIOQUIA en las cuales el monitoreo permanente no fue necesario dada la población de los municipios monitoreados y, por tanto, no aplican los criterios de cobertura temporal anual que fueron establecidos para los sistemas permanentes.

La realización de los cálculos y los respectivos análisis del estado de la calidad del aire a nivel nacional involucró inicialmente la obtención de una base de datos consolidada, la cual fue producto de una gestión intensiva llevada a cabo por el IDEAM con cada autoridad ambiental con el objetivo de solucionar potenciales inconsistencias en los datos cargados a la plataforma SISAIRES. La interacción llevada a cabo permite concluir que es necesario fortalecer las actividades relacionadas con el mantenimiento periódico de los equipos y la validación de los datos; además, se evidenciaron diferentes limitaciones que impidieron lograr una cobertura temporal suficiente de la información durante el periodo analizado, dentro de las que se destacan eventos fortuitos, falta de recursos para operación y mantenimiento, dificultades en el suministro de energía a los equipos y condiciones geográficas de la zona monitoreada.

En cuanto a las tendencias de los contaminantes analizados, los que presentaron mayor preocupación fueron en su orden el $PM_{2.5}$ y el PM_{10} . Sus concentraciones excedieron frecuentemente los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010; adicionalmente, los resultados del cálculo del Índice de Calidad del Aire evidenciaron que representan los mayores riesgos de afectación a la salud de la población. Estas observaciones se destacan especialmente en los grandes centros urbanos de Bogotá, Bucaramanga y el Valle de Aburrá, así como en la jurisdicción de la CAR y en la Zona Minera del Departamento del Cesar.

Las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$ fueron observadas en las estaciones del Valle de Aburrá, la ciudad de Bogotá, específicamente en su zona suroccidental y la Zona Minera del Departamento del Cesar (sector de Plan Bonito), presentándose en algunos años excedencias al correspondiente límite máximo permisible; en cuanto al número de días que exceden el límite diario, las estaciones de estas jurisdicciones también se destacan por tener los valores más altos. Las tendencias del Índice de Calidad del Aire (ICA) muestran afectaciones importantes a la salud al entrar en las categorías “Dañina a la Salud para Grupos Sensibles” y “Dañina a la

Salud". Por las tendencias observadas, se hace prioritario incrementar el monitoreo de este contaminante en el país de manera que se logre un panorama más completo de la contribución del material particulado fino en el deterioro de la calidad del aire.

El PM_{10} fue, con una amplia ventaja, el contaminante más monitoreado en el país con equipos de medición en la totalidad de los SVCA analizados. Sus concentraciones promedio anuales excedieron el respectivo límite máximo permisible principalmente en ciertas estaciones de las grandes áreas urbanas (Bogotá, Bucaramanga y Valle de Aburrá), la jurisdicción de la CAR y la Zona Minera del Departamento del Cesar; en otras jurisdicciones también se presentaron excedencias, pero estas son menores a las observadas en las zonas ya mencionadas. Las tendencias interanuales muestran que en varias estaciones de los SVCA de CORPAMAG, CORPOCESAR y CORPOGUAJIRA las concentraciones de PM_{10} presentaron un incremento progresivo entre 2011 y 2015, lo cual muestra una creciente afectación en la calidad del aire de sus zonas de jurisdicción. Los resultados del cálculo del ICA para este contaminante evidencian menores afectaciones potenciales a la salud en comparación con el $PM_{2.5}$ y revelan en general una participación no despreciable de una calidad del aire "Moderada" y episodios singulares donde aparecen las categorías "Dañina a la Salud para Grupos Sensibles" y "Muy peligrosa". Esta última clasificación se presentó el 8 de diciembre de 2012 en la estación Buenaventura de la CVC; la autoridad ambiental confirmó la validez del dato.

El ozono (O_3) ocasionalmente excedió los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010 en todos los cuatro SVCA con series anuales representativas: AMVA (Valle de Aburrá), CDMB (Bucaramanga), DAGMA (Cali) y SDA (Bogotá). Sin embargo, las tendencias del ICA no expresan la misma preocupación en comparación con los dos contaminantes anteriores ya que la calidad del aire se mantiene predominantemente en un nivel de baja afectación a la salud, con algunos episodios de calidad del aire "Moderada". Adicionalmente, es importante tener en cuenta que el límite máximo permisible de este contaminante de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ es incluso más estricto que el valor guía establecido por la Organización Mundial de la Salud de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por tanto, esta observación permite inferir que las excedencias de los límites nacionales de este contaminante no necesariamente implican afectaciones considerables a la salud.

Las partículas suspendidas totales (PST) también presentaron excedencias de los límites máximos permisibles en la Zona Minera del Departamento del Cesar, especialmente en las estaciones Plan Bonito, La Jagua Vía y La Loma Centro, en la ciudad de Bogotá, en la zona suroccidental, y en la estación INVEMAR de Santa Marta en el año 2014. Las tendencias de este contaminante son concordantes con el comportamiento del PM_{10} y del $PM_{2.5}$ que son de menor diámetro y del cual forman parte. El monitoreo de PST está cediendo cobertura a menores tamaños, los cuales son más críticos en la afectación del bienestar humano, tal como lo evidencian los resultados.

En cuanto al dióxido de nitrógeno (NO_2), si bien se presentaron excedencias, estas fueron reducidas, se concentraron en dos estaciones del Valle de Aburrá (Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. MED – PJIC en 2015 y Universidad Nacional de Colombia M2 MED – UNFM en 2014 y 2015) y sus concentraciones no fueron lo suficientemente altas para ser clasificadas en una categoría determinada del Índice de Calidad del Aire (ICA).

Para el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO_2) las concentraciones se mantuvieron por debajo de los límites máximos permisibles en todo momento y los valores del ICA muestran una predominancia de una calidad del aire "Buena". Es importante mencionar que no se pueden obtener conclusiones concretas de las tendencias a nivel nacional debido a la baja oferta de información en cuanto al número de SVCA que miden estos contaminantes.

Finalmente, en cuanto a la aproximación inicial del análisis comparativo entre material particulado y casos de Infecciones Respiratorias Agudas (IRA) se evidenció para las ciudades estudiadas la influencia de la contaminación en la afectación de la salud de la población. Es importante continuar con esta investigación con herramientas adicionales que disminuyan la incertidumbre respecto al comportamiento de algunas series de datos.



10. Estudio de caso: Informe técnico del episodio crítico de calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Marzo de 2016.

UN PROYECTO DE:

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Eugenio Prieto Soto

Director

María del Pilar Restrepo Mesa

Subdirector Ambiental

GRUPO TÉCNICO:

Área Metropolitana del Valle de Aburrá:

Subdirección Ambiental

Subdirección de Movilidad

Comunicaciones

Universidad Pontificia Bolivariana

Grupo de Investigaciones Ambientales, GIA

Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá, SIATA

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

Laboratorio de Calidad del Aire, CALAIRE

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

Laboratorio de Higiene y Gestión Ambiental, GHYAM

10.1. Resumen ejecutivo

El Plan Operacional se enfoca en la gestión de episodios de contaminación por PM₁₀ (material particulado inferior a 10 micrones de diámetro), PM_{2.5} (material particulado inferior a 2.5 micrones de diámetro) y O₃ (ozono troposférico), contaminantes que reportan superaciones de los límites máximos permisibles para tiempos cortos (horas) de exposición de la población y que han sido priorizados en las directrices establecidas en el Plan de Descontaminación del Aire.

El PM_{2.5} es el contaminante que deteriora la calidad del aire en el Valle de Aburrá al reportar los niveles más altos del Índice de Calidad del Aire (ICA) en comparación con otros contaminantes criterio.

Para la detección de episodios de contaminación se dispone de tres herramientas fundamentales: el monitoreo local que se realiza a partir de la Red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá, el monitoreo a mesoescala de variables meteorológicas a partir del proyecto SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá) y los modelos de pronóstico de calidad del aire.

La contingencia atmosférica registrada en el Valle de Aburrá en el mes de marzo de 2016, fue declarada debido a una situación sin precedentes caracterizada por el reporte de un ICA “Dañino a la salud de la población” en todas las estaciones de la red de monitoreo donde se hace seguimiento del PM_{2.5}. Esto significa que, en las 8 estaciones ubicadas en diferentes entornos del valle, se superó el límite máximo permisible de PM_{2.5} establecido por la norma colombiana en 50 µg/m³ para exposición de 24 horas.

La causa de este fenómeno fue la acumulación de contaminantes en la atmósfera, emitidos principalmente por fuentes móviles y fijas, debido a la presencia permanente de capas de nubes de baja altura que caracterizan la transición entre la temporada seca y la primera temporada de lluvias del año en el mes de marzo. Esta condición típica de nubosidad fue prolongada y exacerbada por la influencia del Fenómeno del Niño, limitando la cantidad de radiación solar que llega a la superficie, impidiendo así el ascenso de aire y la dispersión de contaminantes en la vertical.

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en consideración a esta problemática, convoca a los Consejos Metropolitanos de Gestión del Riesgo y de Movilidad a revisar la situación y definir conjuntamente medidas para mitigar el problema de contaminación del aire asociado no solo a las múltiples fuentes de emisión, sino a la meteorología local que no estaba favoreciendo la dispersión de contaminantes hacia afuera del valle.

Mediante la Resolución 379 del 18 de marzo de 2016 el Área Metropolitana del Valle de Aburrá declara la contingencia atmosférica, anunciando medidas de seguimiento, información permanente a la comunidad sobre la evolución del episodio (página web de la Entidad, redes sociales y medios de comunicación) y reducción de la emisión de contaminantes en el valle.

La condición de calidad atmosférica “Dañina a la salud de la población” persiste en todas las estaciones y sólo se presenta un mejoramiento de los niveles de calidad del aire durante los primeros días de Semana Santa (semana del 21 al 27 de marzo), por lo que el 29 de marzo se expide la Resolución 421 anunciando que se mantiene el nivel de contingencia atmosférica y se hacen recomendaciones a los entes territoriales asociados al Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Entre las medidas dirigidas al sector transporte, identificado como una de las principales fuentes de emisión en el valle, se tiene la restricción vehicular en todos los municipios, tal como lo tiene establecido Medellín a través del pico y placa; el fortalecimiento del servicio de transporte público colectivo y masivo; los operativos permanentes de control de emisiones vehiculares y la programación de horarios de ingreso y salida del valle

con el sector transporte de carga. Además, se incluye la jornada del día sin carro y sin moto (motores dos y cuatro tiempos) a partir de las 3 pm del sábado 2 de abril hasta las 6 pm del domingo 3 de abril.

En la primera semana de abril se consolida la transición de la temporada seca a la temporada de lluvia, favoreciendo el ascenso y dispersión vertical de contaminantes y el lavado de la atmósfera por efecto de la precipitación. Esto se refleja en una mejoría de los índices de contaminación a partir del 31 de marzo, donde 6 de las 8 estaciones que miden $PM_{2.5}$ presentan una calidad atmosférica “Dañina a la salud para grupos sensibles”.

El 11 de abril se registran concentraciones iguales o inferiores a $35 \mu g/m^3$ en 6 estaciones, indicando una categoría “Moderada”, evidenciando que la problemática ya no es generalizada en todo el valle. En las dos estaciones restantes se identifica una disminución en las concentraciones a pesar de no alcanzar la categoría de “Moderada”. En este sentido se analiza la influencia directa del tráfico vehicular en esas dos estaciones, lo que exige medidas estructurales concebidas en el Plan de Descontaminación del Aire.

En sesión de los Consejos Metropolitanos de Gestión del Riesgo, Ambiental y de Movilidad, el día 12 de abril, el Grupo de Gestión de Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica (GECA) conformado al interior del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, recomienda declarar la finalización de la contingencia atmosférica, basados en la información reportada por las herramientas de análisis para la gestión de episodios.

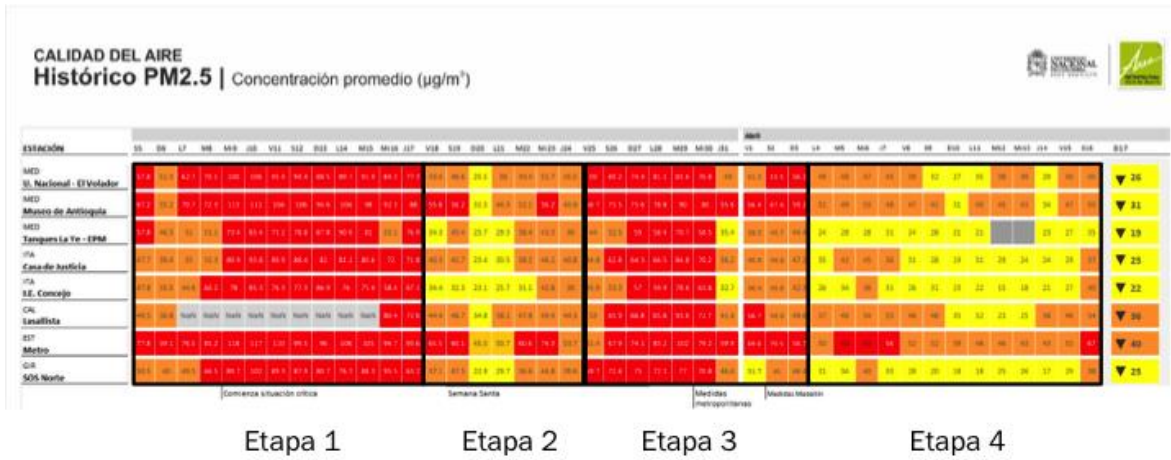
Mediante la Resolución 572 del 18 de abril de 2016, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá levanta la declaratoria de nivel de contingencia atmosférica y entrega recomendaciones a los municipios de mantener las medidas de seguimiento, información y prevención de la contaminación del aire.

10.2. Condiciones de calidad del aire

La contingencia atmosférica presentada en el mes de marzo de 2016, se detectó a partir de las mediciones realizadas por la Red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá, en la que se identificó un incremento significativo de las concentraciones diarias de partículas finas ($PM_{2.5}$) en todas las estaciones donde se hace seguimiento del contaminante, generando un Índice de Calidad del Aire “Dañino a la salud de la población”, la mayor parte del mes de marzo.

- *Etapa 1, del 5 al 17 de marzo:* corresponde al inicio de la contingencia donde se tuvieron los valores más críticos de contaminación (color rojo – ICA dañino para la salud).
- *Etapa 2, del 18 al 24 de marzo:* corresponde al período de la Semana Santa, en donde además de la reducción de la movilidad, las condiciones meteorológicas fueron favorables para la dispersión de contaminantes.
- *Etapa 3, del 25 de marzo al 3 de abril:* se presentan condiciones meteorológicas desfavorables y nuevamente los registros de todas las estaciones determinan ICA dañino para la salud.
- *Etapa 4, del 4 al 16 de abril:* se declara el final de la contingencia; los valores del ICA cambian a un estado moderado (en algunos casos dañinos para grupos sensibles), lo cual se atribuye a la consolidación de la temporada de lluvias.

Figura 10-1. Seguimiento realizado por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá al Índice de Calidad del Aire para las estaciones de la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá que monitorean PM_{2.5} y PM₁₀.



10.3. Condiciones meteorológicas

Tanto la meteorología como la topografía juegan un papel fundamental en el estado de la calidad del aire de una zona específica, teniendo en cuenta que estas establecen las condiciones y el medio bajo los cuales los contaminantes emitidos se dispersan e interactúan con los demás constituyentes de la atmósfera y su medio circundante. Los terrenos de topografía compleja, como es el caso del valle de Aburrá, se caracterizan por adicionar mayor número de variables y procesos, haciendo que la dinámica atmosférica relacionada con la dispersión de contaminantes y la calidad del aire sea significativamente más compleja. En cualquier caso, entender la fenomenología de la interacción entre las variables involucradas en el proceso, desde el momento de la emisión de los contaminantes hasta su deposición nuevamente en superficie, brinda las herramientas necesarias para el diseño de estrategias de evaluación, prevención y control de los efectos de las altas concentraciones de aerosoles en la atmósfera local.

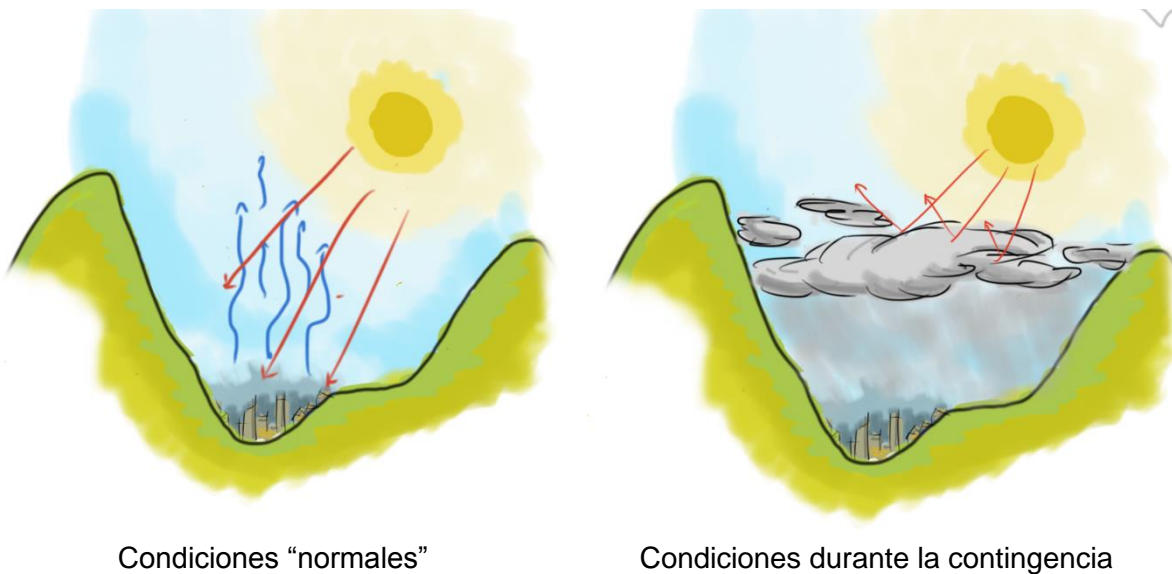
En el caso específico de los procesos de dispersión vertical de los contaminantes, las condiciones de estabilidad atmosférica se consideran como un factor fundamental y determinante, siendo estas quienes condicionan la eficiencia de los movimientos verticales convectivos y, por tanto, de los intercambios entre la superficie y la parte baja de la tropósfera, tanto dentro del valle como con la atmósfera libre. De esta forma, atmósferas estables estratificadas inhiben en gran proporción dichos intercambios, propiciando la suspensión

y acumulación de las emisiones de fuentes fijas y móviles cerca de la superficie; caso contrario ocurre en condiciones de inestabilidad atmosférica, donde predominan los movimientos convectivos y la presencia de turbulencia que favorecen la dispersión y mezcla de los aerosoles contaminantes.

Típicamente la atmósfera experimenta transiciones de su estado estable a inestable dentro del ciclo diurno, transiciones que son determinadas por la cantidad de energía aportada por la radiación a la superficie, necesaria para activar los flujos turbulentos y el ascenso de las parcelas de aire a las capas superiores de la tropósfera. Cuando la cantidad de energía no es suficiente, la dinámica de las capas de la atmósfera cercanas a la superficie, es significativamente más lenta, lo cual no posibilita un rompimiento de la estabilidad atmosférica, como consecuencia los procesos convectivos disminuyen drásticamente y los contaminantes reducen su capacidad de dispersión en la vertical.

Para el Valle de Aburrá, debido a su compleja configuración topográfica, experimentar condiciones permanentes de estabilidad atmosférica es una situación crítica para el estado de la calidad del aire, debido a que la convección, junto con el lavado por precipitación, son los únicos mecanismos de remoción de contaminantes de la atmósfera en el valle. Las condiciones meteorológicas descritas previamente se establecen como los detonantes de la contingencia ambiental por calidad del aire, que experimentó nuestra región el pasado mes de marzo y parte del mes de abril; las evidencias de lo encontrado a partir del monitoreo con la ayuda de sensores remotos pertenecientes al Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), se presentan a continuación.

Figura 10-2. Condiciones normales y condiciones durante la contingencia en el Valle de Aburrá.

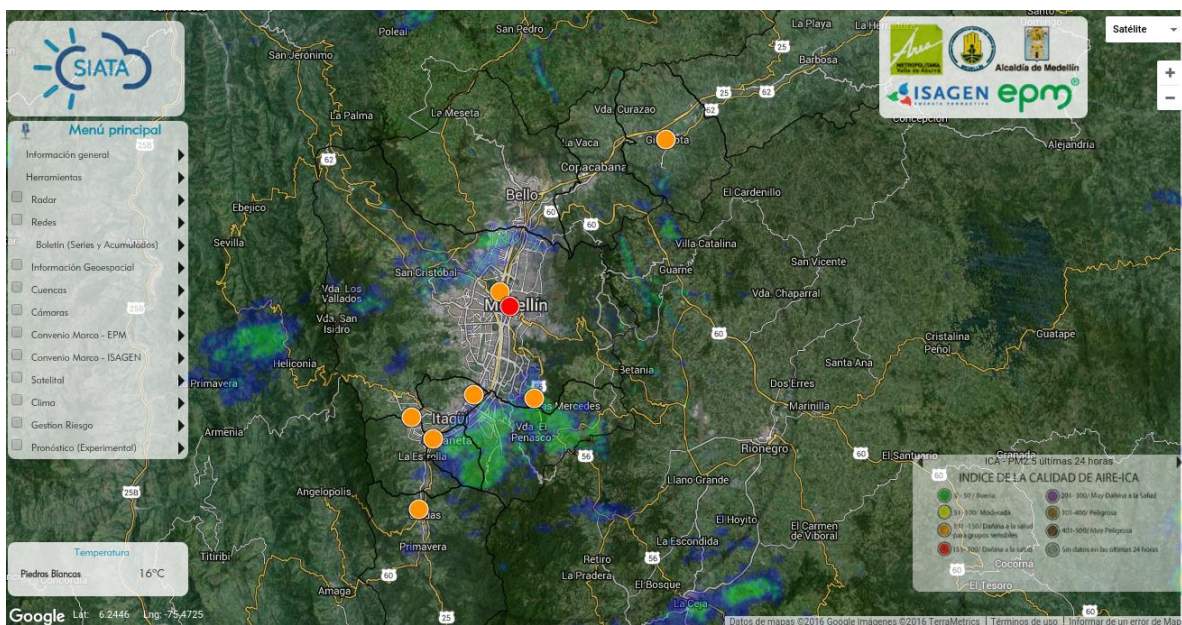


Típicamente la transición se consolida en aproximadamente de 2 semanas y con la presencia de lluvias, el lavado atmosférico de contaminantes favorece las condiciones de calidad de aire en la región. Condiciones atípicas se experimentaron este año con relación a la temporada de transición; el fenómeno del Niño, en su etapa de finalización se convierte en un forzamiento importante para que la temporada de lluvia no se consolide con la rapidez típica y la temporada de transición se extienda más de lo normal.

10.3.1. Análisis meteorológico de la jornada de restricción del vehículo particular en el municipio de Medellín

En la Figura 10-3 se muestra la distribución espacial del valor de ICA para $PM_{2.5}$ entre las 5 pm del 2 de abril de 2016 y las 5 pm del 3 de abril de 2016 donde se puede apreciar un valor de ICA dañino para la salud para grupos sensibles en las todas las estaciones con excepción de la estación ubicada en el Museo de Antioquia en la cual se mantienen condiciones dañinas para la salud. Es importante anotar que, si bien la norma establece el cálculo de ICA para 24 horas día calendario, el mapa incluido en la figura (también construido usando 24 aunque no día calendario) permite evaluar la evolución de las condiciones ante las medidas tomadas y las condiciones meteorológicas presentes.

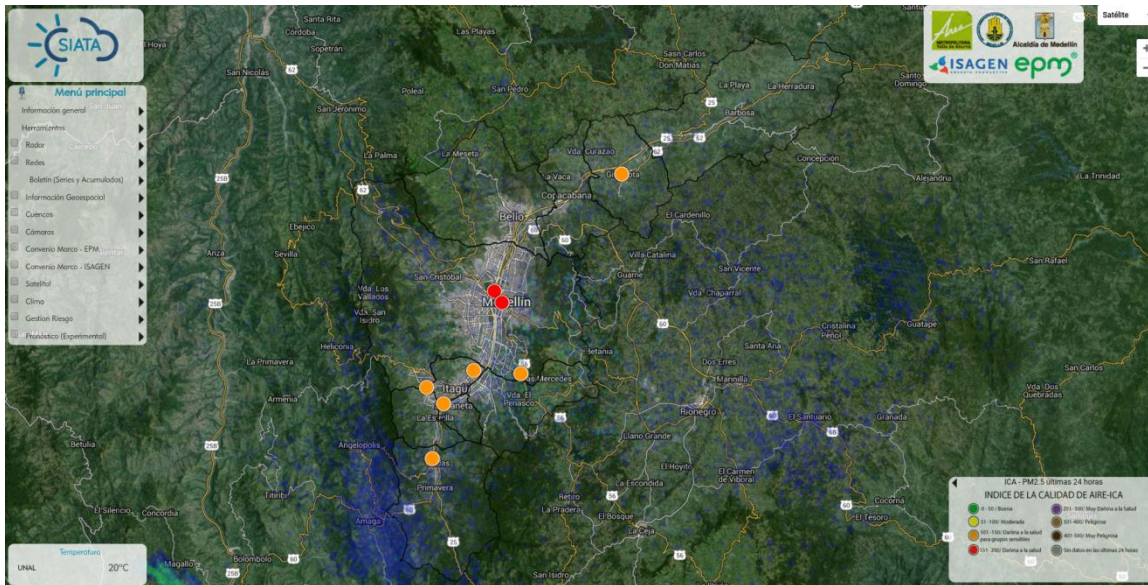
Figura 10-3. Distribución espacial del valor del ICA para $PM_{2.5}$ entre las 5 pm del 2 de abril y las 5 pm del 3 de abril de 2016.



10.3.2. Análisis meteorológico de la jornada de restricción del vehículo particular en el municipio de Medellín, teniendo en cuenta el período donde se levanta la medida

En Figura 10-4 se muestra la distribución espacial del valor de ICA para $PM_{2.5}$ entre las 11 pm del 2 de abril de 2016 y las 11 pm del 3 de abril de 2016 donde se puede apreciar un valor de ICA dañino para la salud para grupos sensibles en todas las estaciones con excepción de la estación ubicada en el Museo de Antioquia en la cual se mantienen condiciones dañinas para la salud. Es importante anotar que, si bien la norma establece el cálculo de ICA para 24 horas día calendario, el mapa incluido en la figura (también construido usando 24 horas, aunque no día calendario) permite evaluar la evolución de las condiciones ante las medidas tomadas y las condiciones meteorológicas presentes.

Figura 10-4. Distribución espacial de ICA PM_{2.5} entre las 11 pm del 2 de abril y las 11 pm del 3 de abril de 2016.



10.4. Medidas aplicadas durante el episodio

A través de la Resolución 379 del 18 de Marzo de 2016, se declaró la contingencia atmosférica en la que se anunciaron las siguientes medidas de seguimiento, información y reducción de la emisión de contaminantes al aire para el valle de Aburrá:

- Publicación diaria a través de la página web de la entidad, de las redes sociales y medios de comunicación, sobre la evolución del índice de calidad de aire.
- Implementar operativos de control de quemas abiertas ya sea por acciones antropogénicas o naturales.
- Realizar operativos permanentes de seguimiento a las emisiones vehiculares, con énfasis en camiones, buses, y motos, ya sea a partir de instrumentos de medición, o con evaluación visual y control a emisiones ostensiblemente visibles.
- Recomendar a todos los sectores económicos implementar los planes empresariales de movilidad sostenible propuestos en el artículo 14 de la Resolución Metropolitana N° 2381 de 2015; especialmente los referidos a teletrabajo, escalonamiento industrial, horarios laborales flexibles, compartir el vehículo, entre otros.
- Recomendar a los habitantes metropolitanos realizar actividades físicas y/o deportivas al aire libre después de las diez (10) de la mañana y en las horas finales de la tarde, que son períodos de menor emisión de contaminantes al aire o de formación de contaminantes secundarios, y donde las condiciones meteorológicas favorecen la dispersión de éstos y se presenta reducción de la radiación solar.
- De igual manera, durante las sesiones permanentes de los Consejos de Movilidad y Gestión del Riesgo, se definió que teniendo en cuenta que el principal aporte de contaminantes atmosféricos, son las fuentes móviles -especialmente por vehículos particulares y motos-, las autoridades territoriales competentes deberán propender por la disminución de la circulación de vehículos particulares y motos, entre otras medidas, mediante el fortalecimiento del servicio de transporte público colectivo y masivo, concertando frecuencias y horarios extendidos en la prestación del servicio.

Mientras persista la contingencia atmosférica, los Consejos Metropolitanos de Movilidad y de Gestión del Riesgo del Valle de Aburrá sesionarán de forma permanente monitoreando diariamente el índice de calidad del aire de acuerdo con los reportes de la red de monitoreo del Valle de Aburrá.

A partir del 30 de marzo se inició la medida restrictiva del pico y placa metropolitano en todos los municipios del Valle de Aburrá -en los mismos horarios y placas que lo tiene establecido el municipio de Medellín.

10.4.1. Medidas por sector

En consideración a que las condiciones de calidad del aire en el valle de Aburrá no mejoraban, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá mediante Resolución Metropolitana 421 del 29 de Marzo de 2016, mantiene el nivel de contingencia atmosférica y se adoptan medidas adicionales que se describen a continuación.

▪ Salud

Implementar el protocolo de salud ambiental que posibilite evaluar los impactos de la calidad del aire en la salud de las personas, especialmente por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

▪ Transporte

Con respeto a la autonomía municipal y mientras permanezcan las condiciones de contingencia atmosférica, se recomienda implementar la medida restrictiva del pico y placa en todos los municipios del Valle de Aburrá en los mismos horarios y placas que lo tiene establecido el municipio de Medellín. Además, se recomienda analizar que dicha medida pueda ser aplicada al transporte privado en los horarios de 6 a 9 am y de 5 a 7pm, incluyendo las motos de 2 y 4 tiempos.

Fortalecer el servicio de transporte público colectivo y masivo, aumentando frecuencias y horarios en la prestación del servicio.

Realizar operativos permanentes de seguimiento a las emisiones vehiculares, con énfasis en camiones, buses y motos, ya sea a partir de instrumentos de medición, o con evaluación visual y control a emisiones ostensiblemente visibles.

Gestionar acuerdos con el sector transporte de carga para la programación de horarios de ingreso y salida del Valle de Aburrá, que permitan implementar programas de conducción ecoeficiente y que regulen los viajes en vacío al interior del Valle de Aburrá.

▪ Industria

Implementar medidas de escalonamiento de emisiones (Pico y Placa Industrial)

10.4.2. Medidas complementarias

- Capacitación a la población en la interpretación adecuada de la información de calidad del aire.
- Revisar y ajustar el Pacto por la calidad del aire, el Plan de Descontaminación del aire y el Protocolo del Plan Operacional para Enfrentar Episodios Críticos de Contaminación.
- Se propone la Semana del 16 al 23 de abril de 2016, en el marco de la celebración del día de la Tierra como una semana de la Movilidad Sostenible, donde se realicen acciones pedagógicas en torno al uso de movilidad sostenible.

10.5. Análisis del impacto en la calidad del aire de las medidas aplicadas

10.5.1. Redes de monitoreo

Durante la jornada del día sin carro del 02 y 03 de abril, medida implementada como respuesta a los altos índices de contaminación registrados en los días previos, los niveles de $PM_{2.5}$ disminuyeron en promedio 21,0 % en la estación MED-UNNV, 19,1 % en la estación MED-MANT y 46 % en la estación MED-LAYE.

10.5.2. Modelos de diagnóstico

El Modelo de Inventario de Emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (MODEAM), es una herramienta que permite estimar las reducciones de contaminantes provenientes de fuentes fijas, móviles y de área dentro del valle, como resultado de la aplicación de medidas.

Para el episodio de marzo de 2016 se realizaron estimaciones gruesas para evaluar la medida de restricción vehicular a 6 dígitos para automóviles y motos de dos y cuatro tiempos, pero las reducciones en $PM_{2.5}$ no fueron significativas.

10.6. Lecciones aprendidas: acciones- decisiones

Uno de los principales aprendizajes de la contingencia atmosférica fue la capacidad de llegar a acuerdos y consensos metropolitanos y la necesidad de dejar un protocolo establecido para poder enfrentar estas situaciones cuando se llegasen a presentar en el futuro.

Dentro de un ejercicio democrático, participativo y deliberante, los diez alcaldes metropolitanos, con sus equipos de gobierno, participaron activamente en los Consejos Metropolitanos Ambientales y de Movilidad y aprobaron por unanimidad la implementación del pico y placa en todo el valle de Aburrá, en las mismas condiciones y horarios establecidos en Medellín. Cada alcalde reglamentó la decisión y determinó dentro de su jurisdicción las vías sujetas de la restricción.

Un aprendizaje importante es que cuando se tiene un problema que afecta a toda la población, y cada ciudadano es consciente que puede aportar en la solución, el compromiso se hace evidente. Desde las redes sociales y los diferentes medios de comunicación, la ciudadanía mostró interés en cooperar, acató las medidas implementadas y participó activamente.

10.7. Acciones de mejora fundamentadas en la experiencia del episodio marzo – abril 2016

- Formalizar el protocolo para activar automáticamente la respuesta de todos los organismos y consejos involucrados cuando se presente nuevamente una situación similar.
- Revisión y formalización del plan de comunicaciones para contingencias ambientales, identificando la necesidad de revisar la propuesta para que sea incluida en el protocolo.
- Definición de voceros para la contingencia.
- En consideración a los tres aspectos anteriores se deberá poner en marcha el Plan de Acción de Eventos Críticos Ambientales.
- Construcción de informes de calidad del aire utilizando formatos unificados, con el fin de divulgar la información de manera veraz y oportuna.
- Divulgación permanente en diferentes medios de sobre la información de calidad del aire a todos los ciudadanos.

10.8. Conclusiones

- El comportamiento horario del $PM_{2.5}$ indica los mayores picos de concentración en la mañana.
- Se observó el acatamiento de la restricción del día sin carro por parte de la ciudadanía, quien en general dejó su vehículo particular en casa o circuló con tres o más pasajeros. Adicionalmente se generó conciencia ciudadana.
- Durante la jornada del día sin carro y moto establecida por el municipio de Medellín, se observaron reducciones de la concentración de $PM_{2.5}$ entre 25% y 36%.
- Una vez se levantó la restricción del día sin carro, se observó que el ICA de las estaciones de Universidad Nacional Núcleo el Volador y la Estrella Metro, vuelven a pasar de ser dañinos para grupos sensibles a ser dañinos para toda la población y en términos de concentración hubo aumentos en todas las estaciones lo que corrobora el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire.
- La evaluación de la reducción en la concentración promedio de $PM_{2.5}$ obtenida con la medida del 3 de abril en relación con las reportadas el 30 de marzo, indica que el promedio de masa de partículas finas que se evitaron en el aire respirable en 24 horas, fue del orden de 615 microgramos y su composición química fue en un 36% hollín (carbono negro), sustancia con efecto cancerígeno según la OMS (2012). Se estima que 207 microgramos de carbono negro se dejaron de emitir al aire, considerando un promedio para todas las zonas estudiadas.
- Los días 2 y 3 de abril el Área Metropolitana del Valle de Aburrá evaluó las emisiones vehiculares de 168 vehículos, de los cuales el 56% no cumplían la norma de emisión nacional.
- Las medidas de restricción del tráfico vehicular relacionadas con el día sin carro y moto, la adopción del pico y placa metropolitano y las medidas adicionales adoptadas por los municipios del valle de Aburrá, unido a unas mejores condiciones meteorológicas que favorecieron la dispersión de los contaminantes, impactaron en una mejora de la calidad del aire, lo cual se evidencia en los datos arrojados por las estaciones de monitoreo que registraron la transición de una calidad atmosférica dañina para la salud a una calidad dañina para grupos sensibles, con excepción de dos estaciones con influencia directa del tráfico vehicular, lo que exige medidas estructurales (enfoque mediano-largo plazo) concebidas en el Plan de Descontaminación del Aire.



11. Estudio de caso: CORPOBOYACÁ. Estado de la calidad del aire reportada a SISAIRE periodo 2011-2015

GRUPO DE TRABAJO

CORPOBOYACA

Ing. JOSÉ RICARDO LÓPEZ DULCEY

Director General

Dra. BERTHA CRUZ FORERO

Subdirectora de Administración de Recursos Naturales

Ing. MAURICIO ANDRÉS ROJAS TORRES

Profesional Subdirección de Administración de Recursos Naturales.

Ing. MARÍA FERNANDA TORRES MANTILLA

Profesional Subdirección de Administración de Recursos Naturales.

Ing. CAMILO CORREA BALAGÜERA

Profesional Subdirección de Administración de Recursos Naturales.

Ing. CAROLINA VASQUES PEDREROS

Profesional Subdirección de Administración de Recursos Naturales.

11.1. Presentación

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACA en aras de garantizar la preservación del entorno y los recursos naturales en el área de jurisdicción recientemente se encuentra adelantando la puesta en marcha del sistema de vigilancia de calidad del aire (SVCA) y es por ello que dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente de calidad del aire en cuanto a seguimiento, vigilancia y control, se permite presentar el reporte de evaluación de calidad del aire para el periodo 2011-2015.

11.2. Análisis de calidad del aire periodo 2011-2015

La Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACA para los años 2011-2015 contaba con 5 sitios donde se ubicó estaciones de monitoreo de calidad del aire distribuidas de la siguiente forma.

Tabla 11-1. Estaciones de Monitoreo de calidad del aire 2011-2015

Año	Estaciones				
2011	NAZARETH	PAIPA	RECREO		
2012	NAZARETH	PAIPA	RECREO		
2013			RECREO		
2014			RECREO	HOSPITAL	RAMADA
2015			RECREO	HOSPITAL	RAMADA

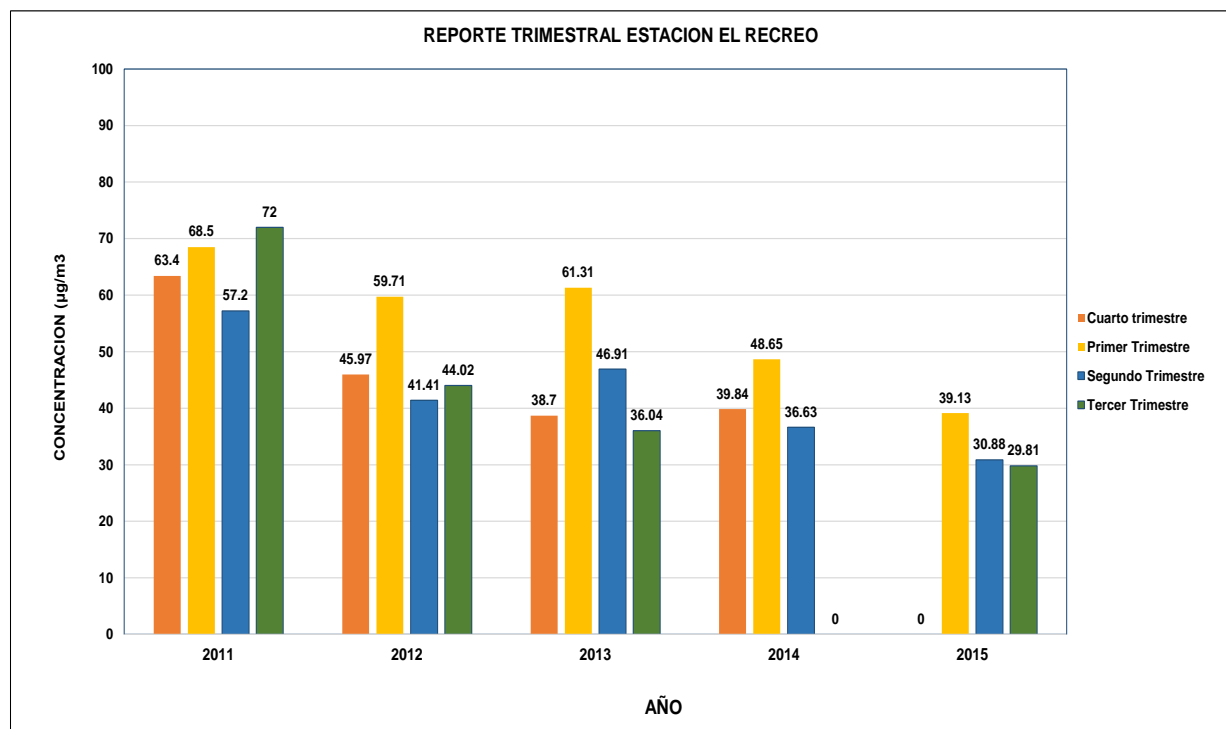
Fuente: CORPOBOYACA, 2016

11.2.1. Análisis de resultados para el año 2011- 2015 Estación Recreo

La estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el parque Recreacional de Norte (RECREO) está en operación desde el año 2011 hasta el momento.

■ Indicadores de Material Particulado PM₁₀

Figura 11-1. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀ por trimestre Años 2011-2015

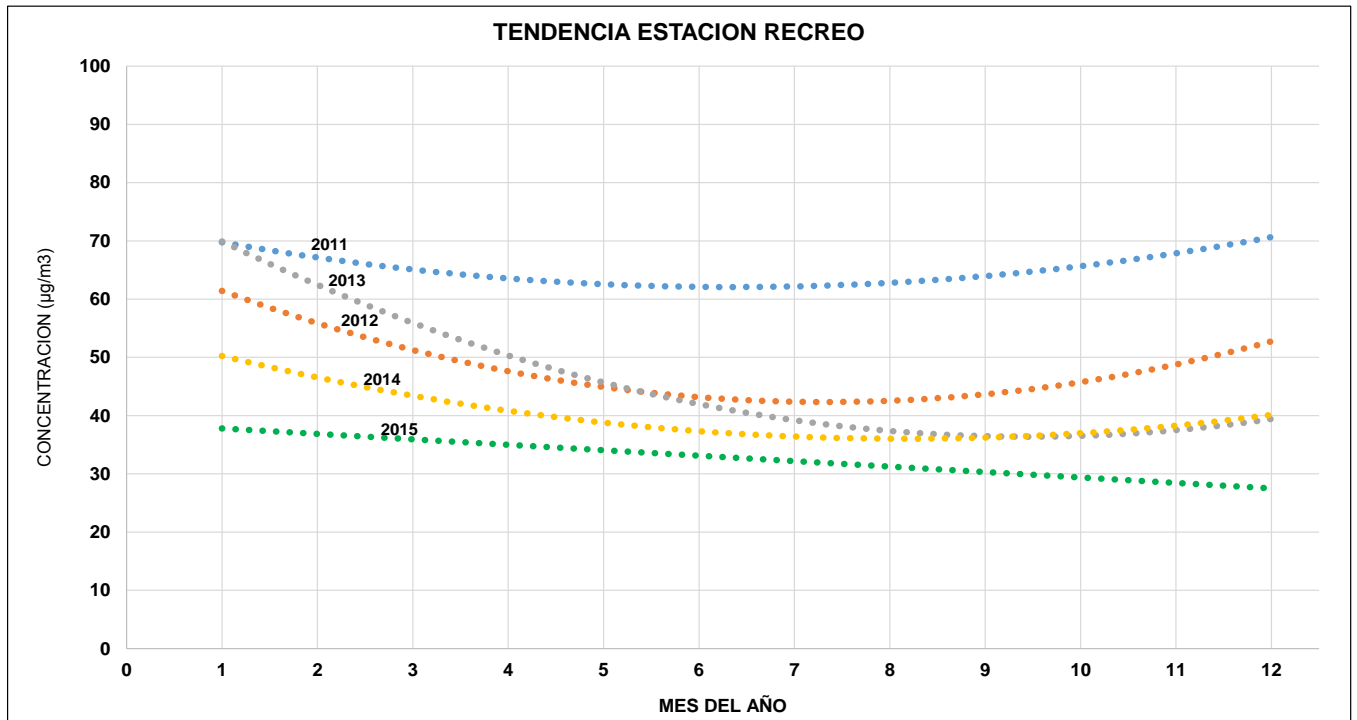


Fuente: CORPOBOYACA, 2016

La estación de Monitoreo el Recreo en el año 2011 a 2015, se destaca que la concentración de PM_{10} no sobrepasa en ningún día el límite máximo permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición de 24 horas, según Resolución 0610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y para el índice de calidad del aire-ICA se categoriza como clasificación **buena**.

▪ **Tendencia Estación Recreo PM_{10}**

Figura 11-2. Comportamiento del Material particulado PM_{10} , Estación Recreo Años 2011-2015



Fuente: CORPOBOYACÁ, 2016

La tendencia de la estación el Recreo muestra que a partir del año 2011 hasta 2015 se ha venido reduciendo significativamente los índices de material particulado PM_{10} gracias a las gestiones realizadas por CORPOBOYACA como autoridad ambiental, apoyando proyectos de reconversión Tecnológica para el sector alfarero, ejecución del proyecto Erradicación de fuentes Contaminantes y compromisos de reducción de emisiones con las grandes industrias del Valle de Sogamoso.

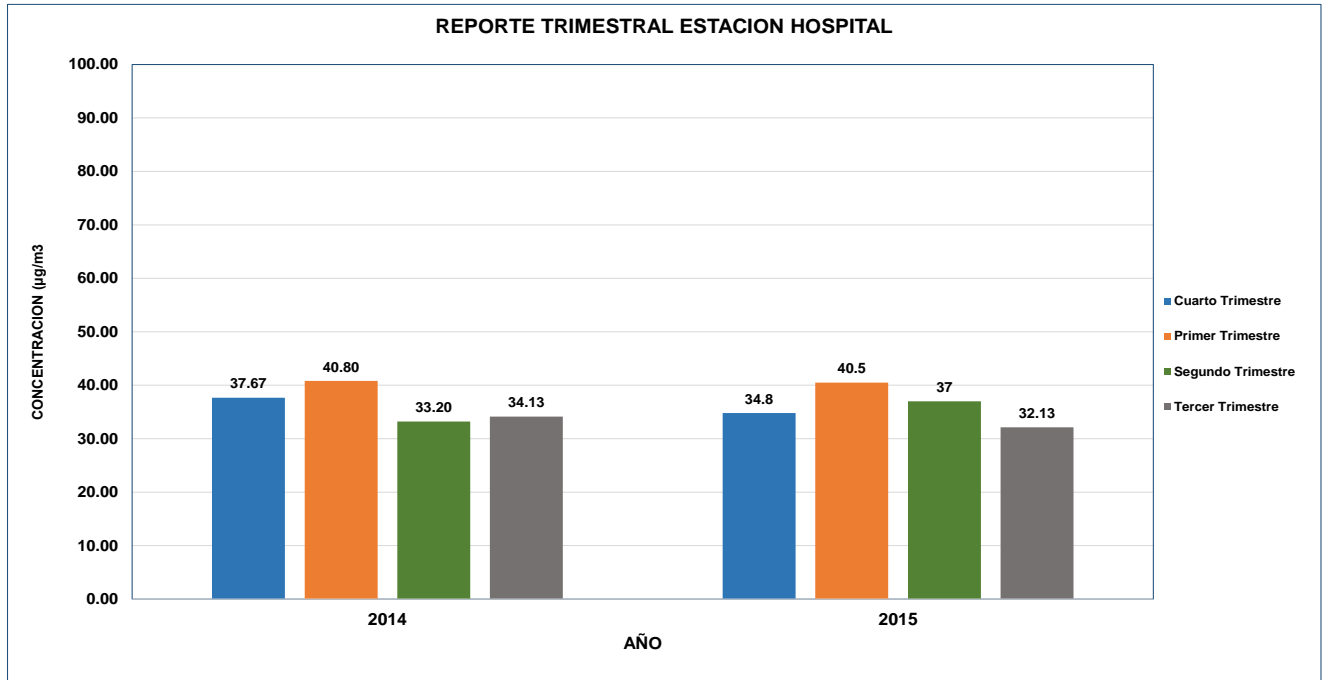
Para el año 2011 la tendencia de la estación el Recreo se ubicaba en $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} y en el 2015 la tendencia de la estación el Recreo se ubica por debajo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} .

11.2.2. Análisis de resultados para el para el año 2011- 2015 Estación Hospital

La estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el Hospital Regional de Sogamoso (HOSPITAL) está en operación desde el año 2014 hasta el este momento.

▪ **Material Particulado PM₁₀**

Figura 11-3. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀ por trimestre Años 2014-2015

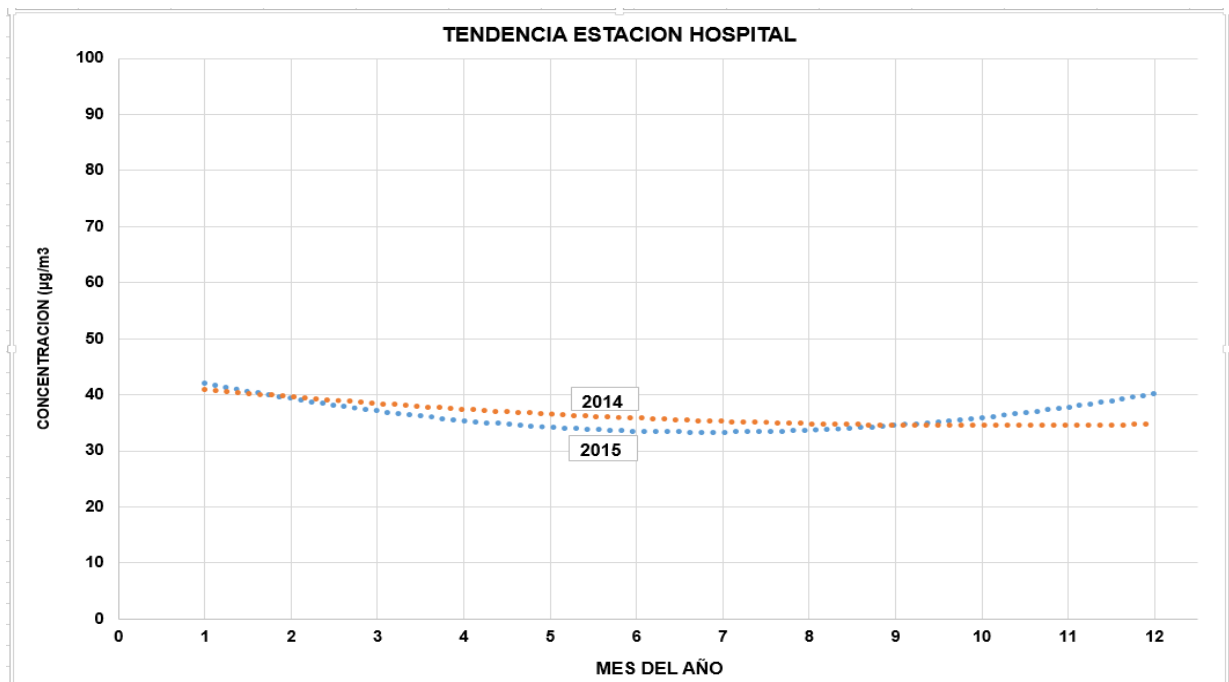


Fuente: CORPOBOYACA, 2016

La estación de Monitoreo Hospital para el año 2014-2015 la concentración de PM₁₀ no sobrepasa el límite permisible de 100 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas, según resolución 0610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y en cuanto al ICA se categoriza como clasificación **buena**.

▪ **Tendencia Estación HOSPITAL PM₁₀**

Figura 11-4. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀, Estación Hospital Años 2014-2015



Fuente: CORPOBOYACA, 2016

Para los años 2014 y 2015 la estación de monitoreo de calidad del aire ubicada en el Hospital registra concentraciones por debajo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, según este indicador el ICA se categoriza como clasificación **buena**.

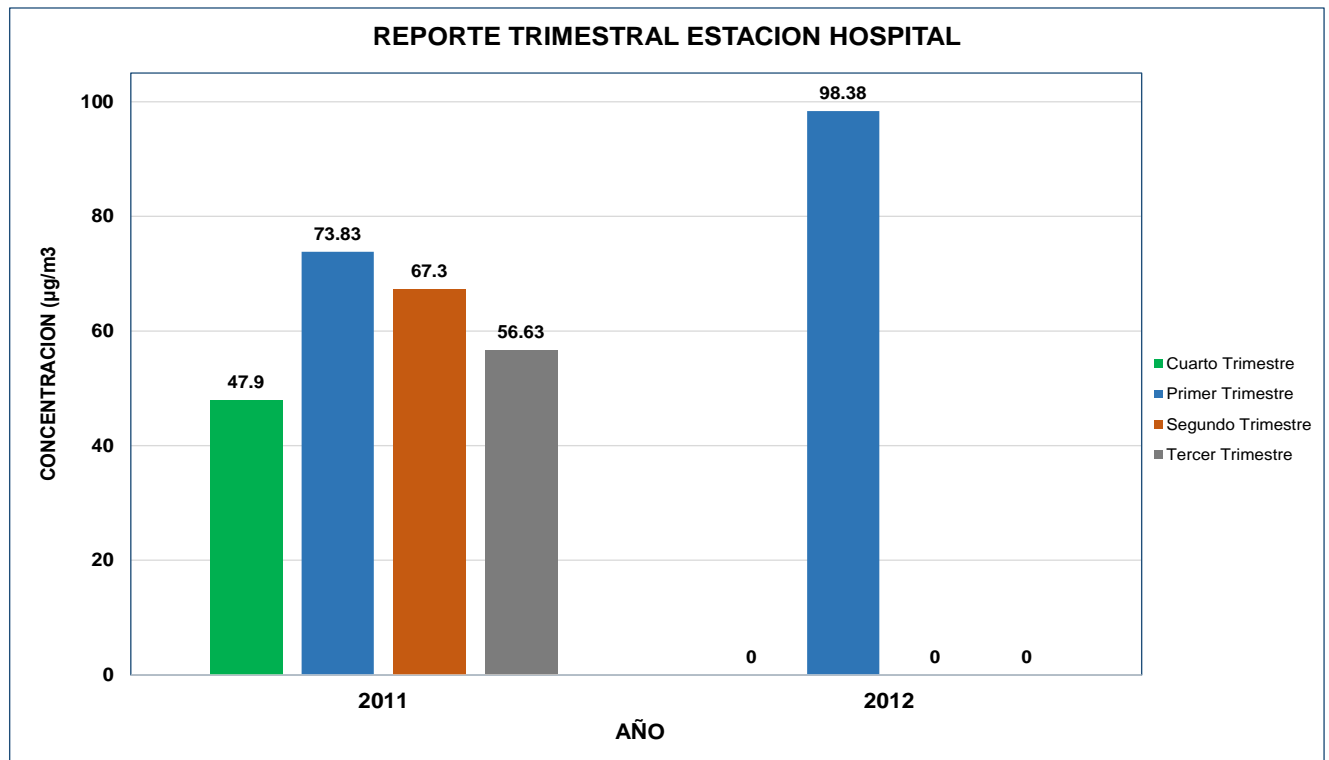
Para el año 2014 la tendencia de la estación Hospital se ubicaba en $35 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$ y en el 2015 la tendencia de la estación Hospital se ubica en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{PM}_{10}$.

11.2.3. Análisis de resultados para el para el año 2011- 2015 Estación Nazareth

La estación de Monitoreo de calidad del aire Nazareth, estuvo en funcionamiento para los años 2011 y 2012, luego fue trasladada a la Ramada con el fin de monitorear otro punto dentro del perímetro del Valle de Sogamoso.

- **Material Particulado PM_{10}**

Figura 11-5. Comportamiento del Material Particulado PM_{10} por trimestre Años 2011-2012



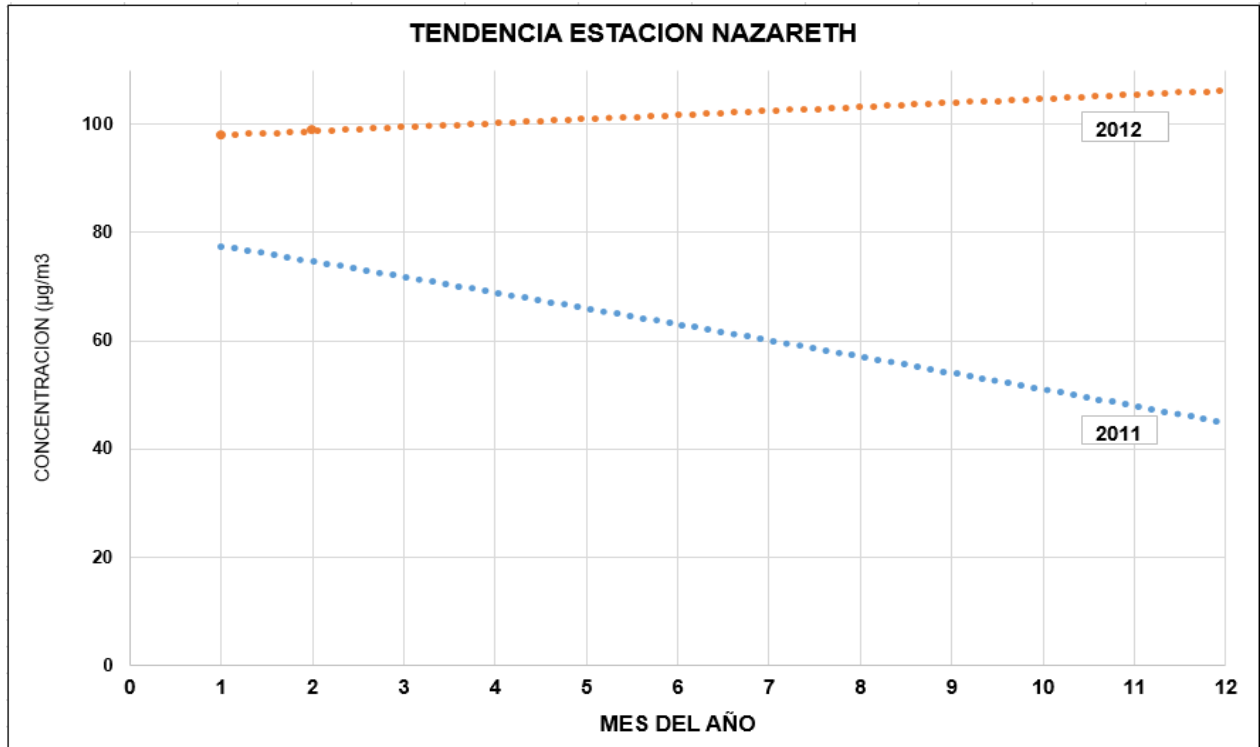
Fuente: CORPOBOYACA, 2016

En el primer trimestre del año 2012 según la gráfica se registra la concentración más alta de PM_{10} con un indicador de $98.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

De acuerdo a los indicadores de calidad del aire de la estación de Monitoreo Nazareth para el año 2011 y 2012 la concentración de PM_{10} no sobrepasa el límite permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un tiempo de exposición de 24 horas, según resolución 0610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y para el ICA se categoriza como clasificación **buena**.

▪ **Tendencia Estación Nazareth PM₁₀**

Figura 11-6. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀, Estación Nazareth Años 2011-2012



Fuente: CORPOBOYACA, 2016

Para el año 2012 la estación ubicada en Nazareth muestra una tendencia por encima de la normatividad vigente según resolución 0610 de 2010, 100 µg/m³ en el periodo comprendido entre los meses julio a diciembre, se encuentra en el límite permisible de PM₁₀.

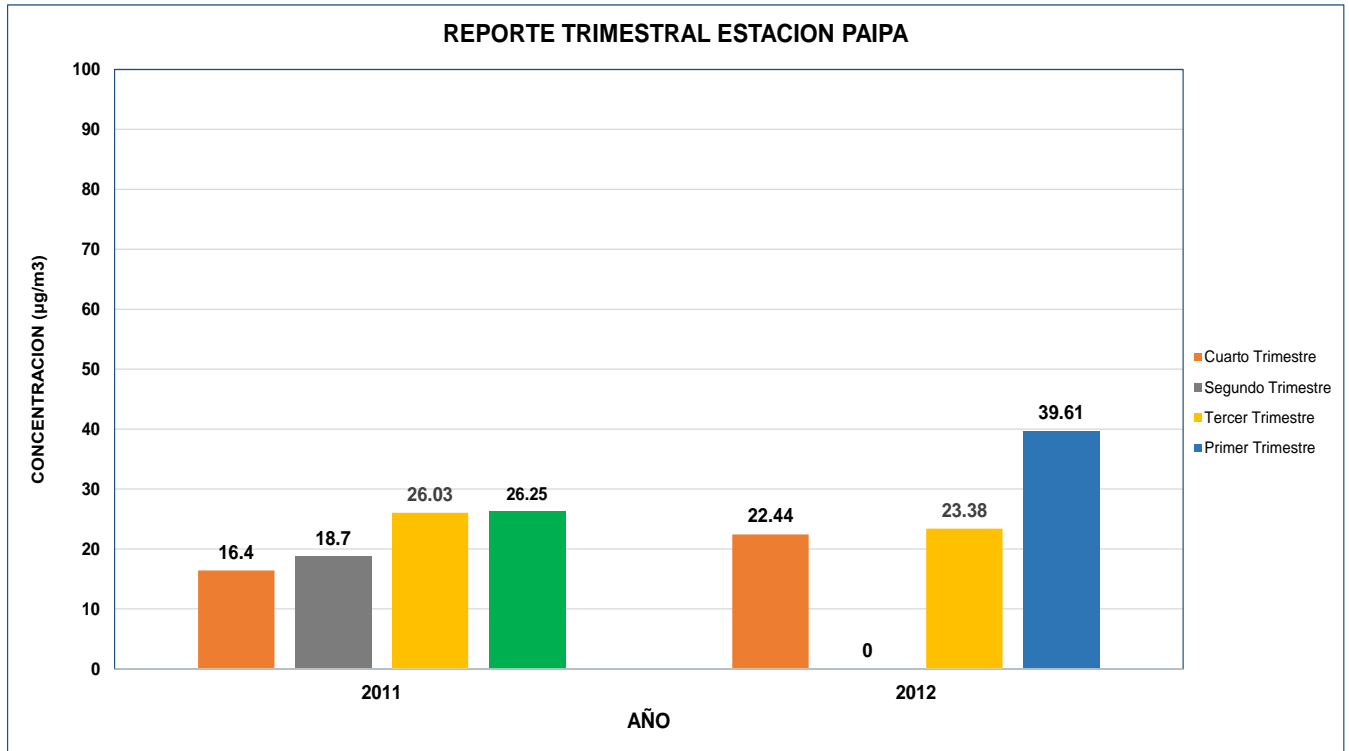
En el año 2011 para el periodo de julio a diciembre la gráfica muestra una tendencia donde se disminuye la concentración de PM₁₀ hasta llegar a 45 µg/m³, para este año se encuentra por debajo del límite permisible según la resolución 0610 de 2010.

11.2.4. Análisis de resultados para el para el año 2011- 2015 Estación Paipa

La estación de Monitoreo de calidad del aire Ubicada en Paipa registra concentraciones en el SISAIRE para los años 2011 y 2012.

▪ Material Particulado PM₁₀

Figura 11-7. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀ por trimestre Años 2011-2012



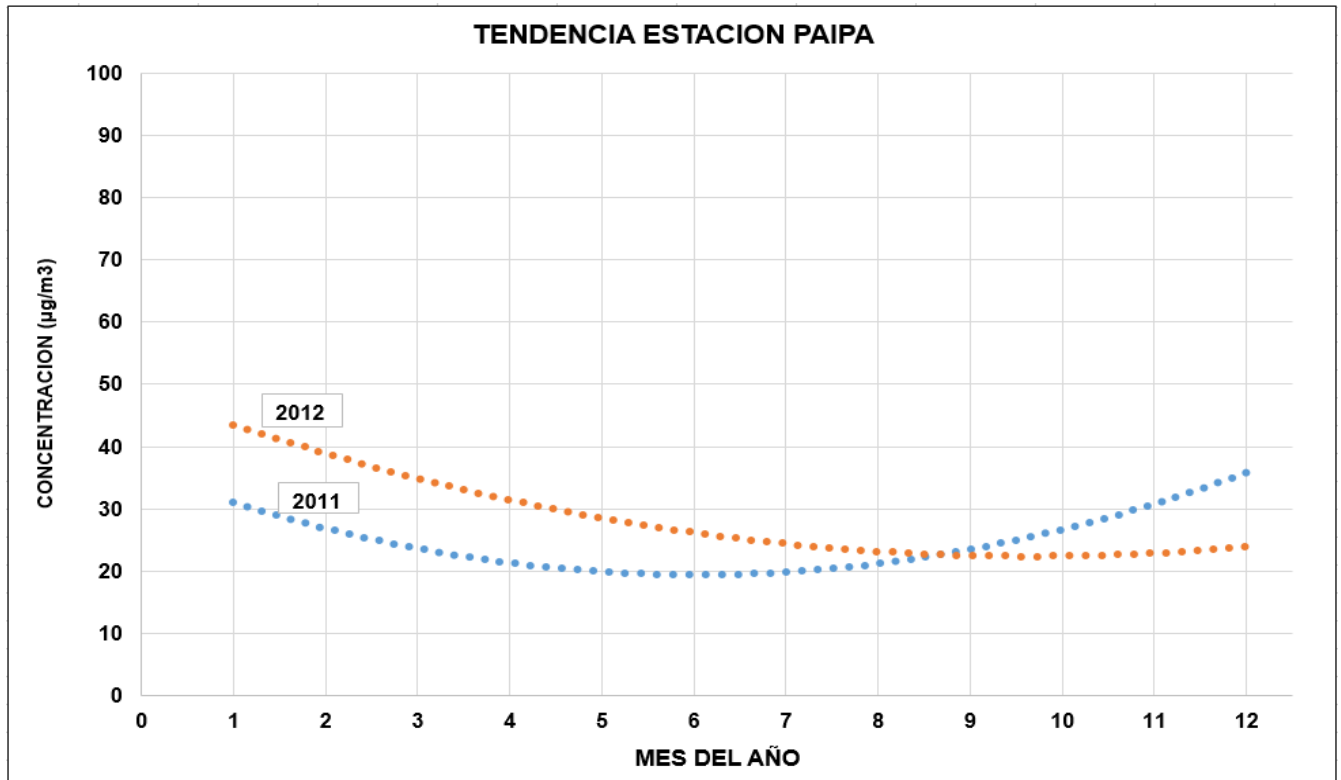
Fuente: CORPOBOYACA, 2016

En el cuarto trimestre del año 2011 según la gráfica se registra la concentración más baja de PM₁₀ con un indicador de 16.4 µg/m³ en ese mismo trimestre en el año 2012 se presenta el nivel más bajo de concentración de PM₁₀ con un valor de 22.44 µg/m³

Para el año 2012 en el primer trimestre se presenta una concentración de 39.61 µg/m³, lo cual significa que la concentración de PM₁₀ no sobrepasa el límite permisible de 100 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas, según resolución 0610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y para el ICA se categoriza como clasificación **buena**.

▪ **Tendencia Estación Paipa PM₁₀**

Figura 11-8. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀, Estación Paipa Años 2011-2012



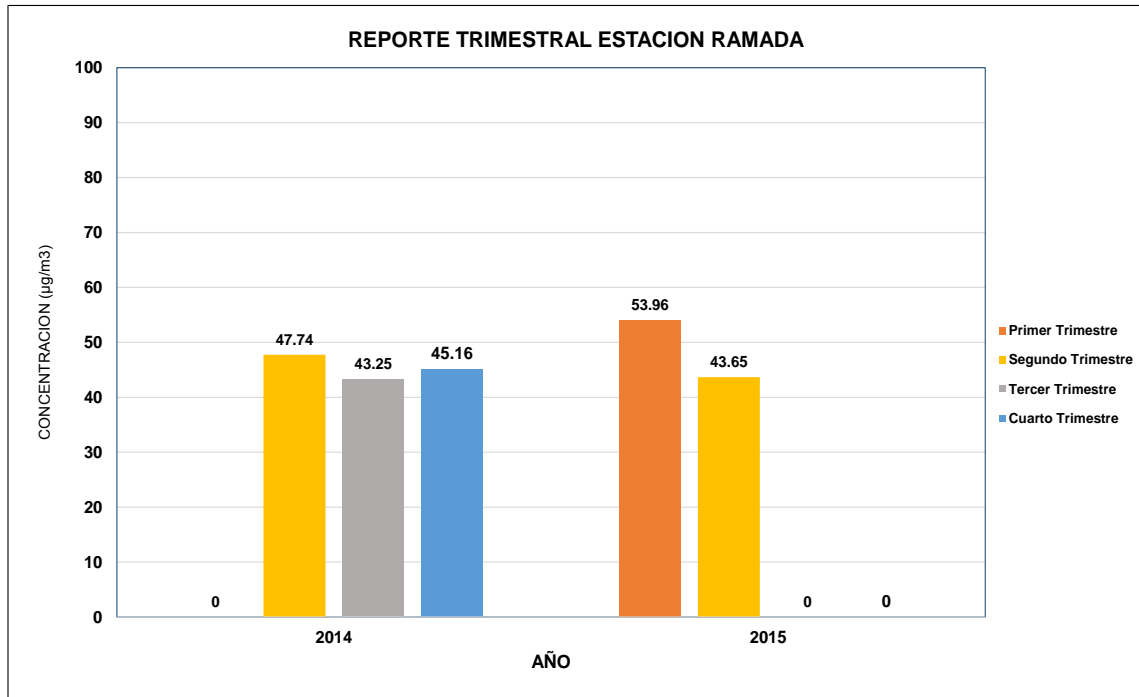
Fuente: CORPOBOYACA, 2016

Para el año 2011 y 2012 la estación ubicada en Paipa muestra una tendencia por debajo de la normatividad vigente según resolución 0610 de 2010, 100 µg/m³ se puede evidenciar que para el mes de agosto de 2011 y 2012 la concentración se encuentra por debajo de 30 µg/m³ registrando los valores más bajos en estos dos años.

11.2.5. Análisis de resultados para el para el año 2011- 2015 Estación la Ramada

La estación de Monitoreo de calidad del aire Ubicada en la Ramada se encuentra en funcionamiento desde el año 2014 hasta 2015, esta estación era la que se encontraba ubicada en Nazareth, en el SISAIRE registra concentraciones para los años 2014 y 2015.

Figura 11-9. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀ por trimestre Años 2014-2015



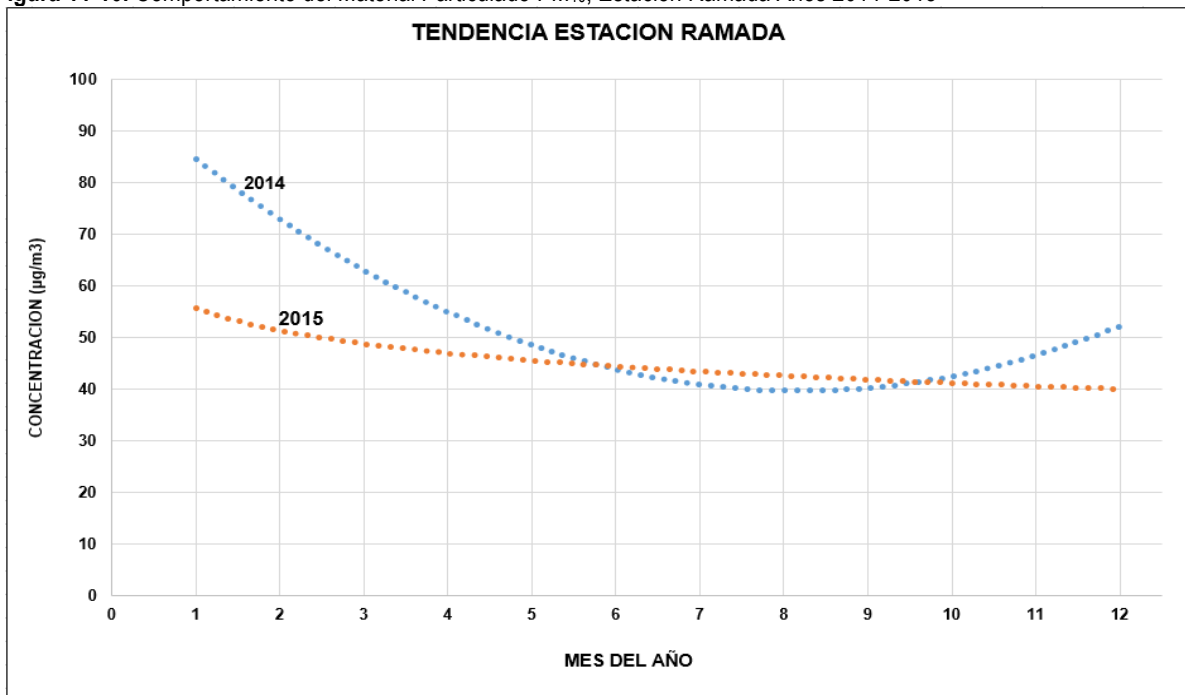
Fuente:

CORPOBOYACA, 2016

En los años 2014 y 2015 según la gráfica se registra unas concentraciones de PM₁₀ entre 42 µg/m³ y 52 µg/m³. No se sobrepasa el límite permisible de 100 µg/m³ para un tiempo de exposición de 24 horas, según resolución 0610 de 2010 del Ministerio de Ambiente y para el ICA se categoriza como clasificación **buena**.

▪ **Tendencia Estación Ramada PM₁₀**

Figura 11-10. Comportamiento del Material Particulado PM₁₀, Estación Ramada Años 2014-2015



Fuente: CORPOBOYACA, 2016



Para el año 2014 se puede evidenciar según la gráfica en el primer trimestre se presenta las concentraciones de PM_{10} más altas con un valor máximo de $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y presenta una reducción de concentración de PM_{10} para el tercer Trimestre del mismo año con un valor de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el año 2015 el primer trimestre presenta una reducción significativa de acuerdo al año anterior, registrando un valor de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, al finalizar el año las concentraciones de PM_{10} se registran en menos de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual significa un balance positivo en la finalidad de reducir las contracciones de PM_{10} en el valle de Sogamoso.

11.3. Conclusiones

- En la Figura 11-2, la estación el Recreo ubicada en el municipio de Sogamoso evidencia concentraciones de material particulado mayores para los años 2011, 2012 y 2013 y menores para los años 2014 y 2015, esto teniendo en cuenta las gestiones realizadas por CORPOBOYACA como autoridad ambiental, apoyando proyectos de reconversión Tecnológica para el sector Alfarero, ejecución del proyecto “Erradicación de fuentes Contaminantes y compromisos de reducción de emisiones con las grandes industrias del Valle de Sogamoso”.
- Las concentraciones de PM_{10} para el municipio de Sogamoso y Nobsa no superan valores máximos admisibles para un tiempo de exposición de 24 horas, exigidos por la Resolución 601 de 2006 “Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia” modificada por la Resolución 610 de 2010, la cual se encuentra vigente a la fecha.
- Teniendo en cuenta que para el año 2012 se reportan concentraciones de material particulado PM_{10} , se refleja en los datos que las menores concentraciones son en Paipa, seguidas de Sogamoso y las más altas se encuentran en Nobsa.

12. Glosario de términos

La siguiente lista de términos tiene como base el Artículo 1 de la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, ahora Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, y se encuentra complementada con definiciones adicionales.

Aire: fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.

Atmósfera: es la capa gaseosa que rodea a la Tierra.

CO (monóxido de carbono): gas inflamable, incoloro e insípido que se produce por la combustión de combustibles fósiles.

Combustibles fósiles: se designa a los depósitos geológicos de materiales orgánicos combustibles que se encuentran enterrados y que se formaron por la descomposición de plantas y animales que fueron posteriormente convertidos en petróleo crudo, carbón, gas natural o aceites pesados al estar sometidos al calor y presión de la corteza terrestre durante cientos de millones de años (IDEAM, 2012).

Compuestos orgánicos volátiles: cualquier compuesto orgánico (que contiene carbón) que se evapora con facilidad hacia la atmósfera a temperatura ambiente (IDEAM, 2012).

Concentración de una sustancia en el aire: es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida.

Condiciones de referencia: son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, que respectivamente equivalen a 25°C y 760 mm Hg (1 atmósfera de presión).

Contaminación atmosférica: es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes en el aire.

Contaminantes: sustancias en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que, solos o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas.

Emisión: descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.

Episodio o evento: es la ocurrencia o acaecimiento de un estado tal de concentración de contaminantes en el aire que, dados sus valores y tiempo de duración o exposición, impone la declaratoria por la Autoridad Ambiental competente, de alguno de los niveles de contaminación, distinto del normal.

Estaciones automáticas: son aquellas que no requieren análisis posterior de la muestra tomada. Por medio de métodos ópticos o eléctricos se analiza la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, de modo que se puedan tomar acciones inmediatas ante la ocurrencia de un evento de concentraciones altas de algún contaminante (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Estaciones manuales: se caracterizan por requerir un laboratorio como apoyo para el análisis de las muestras tomadas. Requieren además, una rutina para la recolección de las muestras, de acuerdo con una periodicidad establecida (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

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: es la 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.

Índice de Calidad del Aire (ICA): el ICA corresponde a una escala numérica a la cual se le asigna un color, el cual a su vez tiene una relación con los efectos a la salud (IDEAM, 2012).

Inmisión: transferencia de contaminantes de la atmósfera a un "receptor". Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión.

Media móvil: se calcula del mismo modo que el promedio aritmético para una cantidad n de datos y se va recalculando a medida que se agregan nuevos datos, partiendo del último dato agregado y manteniendo siempre el número de datos correspondiente a la cantidad definida.

NO₂ (dióxido de nitrógeno): gas de color pardo rojizo fuertemente tóxico cuya presencia en el aire de los centros urbanos se debe a la oxidación del nitrógeno atmosférico que se utiliza en los procesos de combustión en los vehículos y fábricas.

Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión: es el nivel de concentración legalmente permisible de sustancias o contaminantes presentes en el aire, establecido por el entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

O₃ (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.

PM₁₀ (Material Particulado Menor a 10 Micras): material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros.

PM_{2.5} (Material Particulado Menor a 2,5 Micras): material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5 micrómetros.

Promedio aritmético: es la sumatoria de todos los datos a promediar, dividido por el número total de datos.

Promedio geométrico: corresponde al antilogaritmo del promedio aritmético de los logaritmos de las concentraciones diarias.

PST (Partículas Suspensas Totales): material particulado que incluye tanto a la fracción inhalable como a las mayores de 10 micrómetros, que no se sedimentan en períodos cortos sino que permanecen suspendidas en el aire debido a su tamaño y densidad.

Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA): es un conjunto de procesos, herramientas e instrumentos que tienen como fin determinar los niveles de inmisión que se dan en un área determinada (IDEAM, 2012).

Smog: niebla natural intensificada por la acción de los contaminantes industriales; suele ser una mezcla de humo y niebla. Cuando se intensifica por procesos químicos debidos a la radiación solar se llama smog fotoquímico (IDEAM, 2012).

SO₂ (dióxido de azufre): gas incoloro, no inflamable que posee un fuerte olor en altas concentraciones.

Tiempo de exposición: es el lapso de duración de un episodio o evento de contaminación.

Umbral: valor mínimo de una magnitud a partir del cual se produce un efecto determinado (IDEAM, 2012). En este caso, se hace referencia a los umbrales de concentración o límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 610 de 2010.

13. Referencias

- Aphekom. (s.f.). *Improving Knowledge and Communication for Decision Making on Air Pollution and Health in Europe*. Obtenido de <http://www.endseurope.com/docs/110302b.pdf>
- Cancino, J. (2006). Validación y Análisis de la Información de la Red de Calidad del Aire de Bogotá. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Carslaw, D. C. (2015). *The openair manual - open source tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4*. King's College London.
- Carslaw, D. C., & Ropkins, K. (2012). openair - an R package for air quality data analysis. *Environmental Modelling & Software, Volume 27-28*, 52-61.
- Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Kiran Dev Pandey, Krzyzanowski, M., Künzli, N., . . . Smith, K. R. (2004). *Urban air pollution. In: Ezzati M et al., eds. Comparative quantification of health risks. Global and regional burden of disease attributable to selected major factors*. Geneva: World Health Organization.
- IDEAM. (2012). *Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010*. Bogotá, D.C.
- Korc, M. (1999). *Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Krewski, D., Jerrett, M., Burnett, R. T., Ma, R., Hughes, E., Shi, Y., & Thun, M. J. (2009). Extended follow-up and spatial analysis of the American Cancer Society study linking particulate air pollution and mortality. *Res Rep Health Eff Inst*, 140(5), 5-114.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (24 de marzo de 2010). Resolución 610 de 2010. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (29 de marzo de 2010). Resolución 651 de 2010. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Salud Pública. (12 de diciembre de 1973). Ley 23 de 1973. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- NILU. (2015). *Lufftforurensing*. Recuperado el 17 de noviembre de 2015, de Norsk institutt for luftforskning - Luftkvalitet.info: <http://www.luftkvalitet.info>
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2016). *Impacto del medio ambiente en la salud*. Obtenido de Salud ambiental: http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/PHE-prevention-diseases-infographic-ES.pdf?ua=1
- Pope III, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama*, 287(9), 1132-1141.
- Presidencia de la República. (22 de 12 de 1993). Ley 99 de 1993. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional.
- Presidencia de la República. (5 de junio de 1995). Decreto 948 de 1995. Bogotá, Cundinamarca, Colombia: Imprenta Nacional.

- R Core Team. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. Obtenido de <https://www.R-project.org/>
- Samoli, E., Peng, R., Ramsay, T., Pipikou, M., Touloumi, G., Dominici, F., & Katsouyanni, K. (2008). Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA study. *Environmental health perspectives*, 116(11), 1480.
- USEPA. (15 de septiembre de 2015). *Fine Particle (PM2.5) Designations*. Obtenido de EPA - United States Environmental Protection Agency: <http://www3.epa.gov/airquality/particlepollution/designations/index.htm>
- USEPA. (2015). *What Are the Six Common Air Pollutants?* Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <http://www3.epa.gov/airquality/urbanair/>
- WHO - Regional Office for Europe. (2006). *Air Quality Guidelines. Global Update 2005*. Copenhagen.
- WHO. (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Obtenido de Air pollution: http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69477/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf
- Wickham, H. (2009). *ggplot2: elegant graphics for data analysis*. New York: Springer.
- World Health Organization - Regional Office for Europe. (2011). *Exposure to air pollution (particulate matter) in outdoor air. Fact sheet 3.3*. Obtenido de http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/ENHIS_Factsheet_3.3_July_2011.pdf
- World Health Organization. (2013). *Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.

I. Anexo: Factores de Conversión de Unidades.

La siguiente tabla presenta los factores de conversión de unidades para contaminantes criterio gaseosos, de partes por billón o partes por millón a $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y mg/m^3 (en el caso del monóxido de carbono, CO). Las unidades resultantes se encuentran en condiciones de referencia, que corresponden a 25°C y 760 mm Hg (1 atmósfera de presión), de acuerdo con la Resolución 610 de 2010 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Los factores de conversión se derivan a partir del uso de la ecuación de los gases ideales. Para mayor información, por favor consultar la sección "7.3.1.1. Manejo y presentación de las variables de calidad del aire" del Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Tabla I-1. Factores de conversión de unidades para contaminantes criterio gaseosos a condiciones de referencia correspondientes a 25°C y 760 mm Hg.

Gas	Factor (multiplicar)	Unidades iniciales	Unidades finales
Ozono (O ₃)	1,9620	ppb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	1,8804	ppb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Monóxido de carbono (CO)	1,1449	ppm	mg/m^3
Dióxido de azufre (SO ₂)	2,6186	ppb	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

II. Anexo: Abreviaturas de los nombres de las estaciones del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Tabla II-1. Nombres y abreviaturas de las estaciones del SVCA del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Nombre de la estación reportado en SISAIRES	Abreviatura
Hospital San Vicente de Paul - Barbosa	BAR-HSVP
Parque De Las Aguas	BAR-PDLA
BELLO	BEL-SEPM
Universidad San Buenaventura	BEL-USBV
Corporación Lasallista	CAL-LASA
Plaza de Mercado Caldas - COPERPLAZA	CAL-PMER
Plaza De Mercado Caldas - Coperplaza (S)	CAL-PMER (S)
Hospital Santa Margarita - Copacabana	COP-HSMA
Secretaria de Medio Ambiente	Estacion_Secretaria
Centro Administrativo Municipal. La Estrella.	EST-CAME
Colegio Maria Goretti	EST-MAGO
Estación Metro La Estrella (Estación móvil)	EST-METR
Institución Educativa Col. - Girardota	GIR-IECO
Girardota - S.O.S Aburrá Norte	GIR-SOSN
Casa de Justicia Itagüí	ITA-CJUS
Colegio Concejo De Itagüí	ITA-CONC
Colegio el Rosario - Itagüí	ITA-CRSV
DITAIRES	ITA-DITA
Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando - Cuarto de Control de Biodigestores.	ITA-PTAR
Planta De Tratamiento De Aguas Residuales San Fernando - Terraza Edificio de Operaciones.	ITA-PTAR
AGUINAGA	MED-AGUI
Corantioquia - Medellín.	MED-CORA
Exito San Antonio - Medellín	MED-EXSA
Medellín - Tanques La Ye EPM	MED-LAYE
Museo de Antioquia	MED-MANT
MEDELLIN MIRAFLORES	MED-MIRA
Politécnico Colombiano Jaime Isaza C.	MED-PJIC
Politécnico Colombiano Jaime Isaza C. (S)	MED-PJIC (S)
Universidad de Medellín	MED-UDEM
UDEM (S)	MED-UDEM (S)
UNE - Casa Yalte	MED-UNEP
Universidad Nacional de Colombia M2	MED-UNFM
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA M2 (S)	MED-UNFM (S)
Estación Móvil 2 - UNAL	MED-UNNV
Tanques Orfelinato de Villahermosa	MED-VIHE
Centro Administrativo Municipal - Sabaneta	SAB-CAMS