



## Informe Anual de Calidad del Aire 2018

Contrato CCT 504 de 2019

Elaborado por:

Universidad EAFIT



Fortalecer y potenciar el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA - y la red de monitoreo de calidad del aire, mediante la investigación aplicada y el desarrollo de estrategias y herramientas de monitoreo e información innovadoras para la región, que permitan consolidar los instrumentos técnicos y científicos para la toma de decisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y los municipios, fundamentados en el conocimiento, la reducción y el manejo de emergencias y desastres ambientales y la transferencia de información y el conocimiento.



Elaborado por:  
Maria Paula Velásquez García, Analista de datos.  
Natalia Roldán Henao, Analista de datos.  
Santiago Jaramillo Gil, Analista de datos.

Revisado y autorizado por:  
Laura Herrera Mejia, Directora de la Red.



Código:  
F-GAA-RA-81  
Versión:  
4

**Nota:** Este informe no puede ser replicado sin autorización del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.



# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Descripción de la red</b>	<b>2</b>
<b>3. Generalidades de los Contaminantes</b>	<b>11</b>
Índice de Calidad del Aire (ICA) . . . . .	13
<b>4. Material Particulado menor a 2.5 <math>\mu m</math> (PM2.5)</b>	<b>14</b>
Ciclo diario de la concentración de PM2.5 . . . . .	15
Ciclo anual de la concentración de PM2.5 . . . . .	16
Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM2.5 durante el 2018 . . . . .	17
Estadísticos de PM2.5 para el 2018 . . . . .	20
<b>5. Material Particulado menor a 10 <math>\mu m</math> (PM10)</b>	<b>22</b>
Ciclo diario de la concentración de PM10 . . . . .	23
Ciclo anual de la concentración de PM10 . . . . .	24
Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM10 . . . . .	25
Estadísticos de PM10 para el 2018 . . . . .	26
<b>6. Ozono (<math>O_3</math>)</b>	<b>28</b>
Ciclo diario de la concentración de Ozono . . . . .	29
Ciclo anual de la concentración de Ozono . . . . .	29

Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias y octohorarias . . . . .	30
Estadísticos de Ozono para el 2018 . . . . .	31
<b>7. Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)</b>	<b>32</b>
Ciclo diurno de la concentración de NO <sub>x</sub> . . . . .	33
Ciclo diurno de la concentración de NO <sub>2</sub> . . . . .	33
Ciclo diurno de la concentración de NO . . . . .	34
Ciclo anual de la concentración de NO <sub>2</sub> . . . . .	35
Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias de NO <sub>2</sub> . . . . .	35
Estadísticos de NO <sub>2</sub> para el 2018 . . . . .	36
<b>8. Monóxido de Carbono (CO)</b>	<b>37</b>
Ciclo diurno de la concentración de CO . . . . .	38
Ciclo anual de la concentración de CO . . . . .	38
Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones octohorarias de CO . . . . .	39
Estadísticos de CO para el 2018 . . . . .	40
<b>9. Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)</b>	<b>41</b>
Ciclo diurno de la concentración de SO <sub>2</sub> . . . . .	41
Ciclo anual de la concentración de SO <sub>2</sub> . . . . .	42
Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias de SO <sub>2</sub> . . . . .	43
Estadísticos SO <sub>2</sub> para el 2018 . . . . .	43
<b>10. Material Particulado menor a 1 μm (PM1)</b>	<b>45</b>
Ciclo diurno de la concentración de PM1 . . . . .	46

Ciclo anual de la concentración de PM1 . . . . .	46
Estadísticos de PM1 para el 2018 . . . . .	47
<b>11.Ruido Ambiental</b>	<b>48</b>
Ciclo diurno de los niveles de presión sonora corregidos horarios . . . . .	49
Ciclo anual de los niveles de presión sonora corregidos diurno y nocturno . . . . .	50
Estadísticos de Ruido Ambiental para el 2018 . . . . .	51
<b>12.Meteorología</b>	<b>53</b>
Radiación Solar, Temperatura y Humedad Relativa . . . . .	54
Precipitación . . . . .	58
Vientos . . . . .	61
<b>13.Sensores remotos para la evaluación de las condiciones meteorológicas y su influencia en la calidad del aire</b>	<b>65</b>
<b>14.Resumen Episodios Criticos 2018</b>	<b>71</b>
<b>15.Anexos</b>	<b>80</b>
Anexo 1. Métodos de medición . . . . .	80
Anexo 2. Desarrollo investigativo respecto a la calidad del aire . . . . .	83

## Índice de Figuras

4.1. Estaciones automáticas de monitoreo de PM2.5. . . . .	14
4.2. Estaciones manuales de monitoreo de PM2.5. . . . .	15
4.3. Ciclo diurno de PM2.5 para las estaciones automáticas ubicadas en el municipio de Medellín . . . .	16
4.4. Ciclo diurno de PM2.5 para las estaciones automáticas ubicadas en los municipios del valle de Aburrá, exceptuando Medellín. . . . .	16
4.5. Ciclo anual del PM2.5 para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá. . . . .	17
4.6. Índice de Calidad del Aire durante el año 2018 para las estaciones automáticas de PM2.5 . . . . .	18
4.7. Índice de Calidad del Aire durante el año 2018 para las estaciones manuales de PM2.5 . . . . .	18
4.8. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones de PM2.5 para el municipio de Medellín. . . . .	19
4.9. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones de PM2.5 ubicadas en los municipios del valle de Aburrá, exceptuando Medellín. . . . .	19
4.10. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones manuales de PM2.5 . . . . .	20
5.1. Estaciones automáticas de monitoreo de PM10. . . . .	22
5.2. Estaciones manuales de monitoreo de PM10. . . . .	23
5.3. Ciclo diurno de PM10 para las estaciones automáticas. . . . .	24
5.4. Ciclo Anual del PM10 para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá. . . . .	24
5.5. Índice de Calidad del Aire para las estaciones automáticas de PM10 durante el 2018. . . . .	25
5.6. Índice de Calidad del Aire para las estaciones semiautomáticas de PM10 durante el 2018. . . . .	25
5.7. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones automáticas de PM10 durante el 2018 . . . . .	26
5.8. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones manuales de PM10 durante el 2018 . . . . .	26
6.1. Estaciones automáticas de monitoreo de Ozono . . . . .	28
6.2. Ciclo diurno de Ozono para las estaciones automáticas . . . . .	29
6.3. Ciclo Anual del Ozono para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá. . . . .	30
6.4. Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones horarias de Ozono . . . . .	30
6.5. Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones octohorarias de Ozono . . . . .	31

7.1. Estaciones automáticas de monitoreo de $NO_x$ . . . . .	32
7.2. Ciclo diurno de $NO_x$ para las estaciones automáticas. . . . .	33
7.3. Ciclo diurno de $NO_2$ para las estaciones automáticas . . . . .	34
7.4. Ciclo diurno de $NO$ para las estaciones automáticas. . . . .	34
7.5. Ciclo Anual de $NO_2$ para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá. . . . .	35
7.6. Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones horarias de $NO_2$ . . . . .	36
8.1. Estaciones automáticas de monitoreo de $CO$ . . . . .	37
8.2. Ciclo Diurno de $CO$ para las estaciones automáticas . . . . .	38
8.3. Ciclo Anual de $CO$ para el año 2018 en las estaciones de la REDMCA. . . . .	39
8.4. Porcentaje de las distintas categorías del ICA para las concentraciones octohorarias de $CO$ en las diferentes estaciones de la REDMCA. . . . .	39
9.1. Estación automática de monitoreo de $SO_2$ . . . . .	41
9.2. Ciclo diurno de la concentración de $SO_2$ para la estación GIR-SOSN durante el año 2018. . . . .	42
9.3. Ciclo Anual de $CO$ para las estaciones automáticas . . . . .	42
9.4. Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para la estación de $SO_2$ . . . . .	43
10.1. Estaciones automáticas de monitoreo $PM_{10}$ . . . . .	45
10.2. Ciclo diurno de $PM_{10}$ para las estaciones automáticas ubicadas en el municipio de Medellín . . . . .	46
10.3. Ciclo Anual del $PM_{10}$ para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá. . . . .	47
11.1. Puntos de monitoreo de la red de ruido ambiental. . . . .	48
11.2. Ciclo diurno de la mediana del nivel de presión equivalente corregido diurno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá. . . . .	50
11.3. Ciclo anual de la mediana del nivel de presión equivalente corregido diurno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá. . . . .	51
11.4. Ciclo anual de la mediana del nivel de presión equivalente corregido nocturno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá. . . . .	51
12.1. Estaciones automáticas de monitoreo de meteorología . . . . .	53
12.2. Ciclo diurno de radiación solar, temperatura y humedad relativa para el año 2018 en las distintas estaciones meteorológicas de la REDMCA. . . . .	55
12.2. Continuación . . . . .	56
12.3. Ciclo anual de radiación solar, temperatura y humedad relativa para el año 2018 en las distintas estaciones meteorológicas de la REDMCA. . . . .	57

12.3. Continuación . . . . .	58
12.4. Precipitación horaria y acumulada para las distintas estaciones . . . . .	59
12.5. Ciclo anual del acumulado de precipitación 2018 . . . . .	60
12.6. Rosas de viento diurnas para las distintas estaciones . . . . .	61
12.7. Rosas de viento nocturnas para las distintas estaciones . . . . .	63
12.8. Rosas de viento totales para las distintas estaciones . . . . .	64
13.1. Ceilómetro Vaisala CL-51 . . . . .	66
13.2. Radar Perfilador de Vientos RAPTOR VAD-BL. . . . .	68
13.3. Radiómetro Microondas MP-3000A. . . . .	69
13.4. LR101-ESS-D200 elastic depolarization Scanning LIDAR. . . . .	70
14.1. Serie de tiempo del Índice NINO3.4 entre Junio del 2017 y junio del 2019. Los periodos sombreados en rojo indican que las anomalías de temperatura superficial del mar han superado el umbral de definición de episodios El Niño, mientras que los periodos en azul corresponden a eventos La Niña. Las líneas punteadas señalan este umbral de $\pm 0.5C$ . . . . .	72
14.2. Ciclo diurno de la precipitación en Marzo del 2017, 2018 y el promedio de los marzos dentro del valle de Aburrá. . . . .	72
14.3. Concentración promedio mensual de PM2.5 para las estaciones del valle de Aburrá durante marzo del 2017 y 2018. . . . .	73
14.4. Índice de Calidad del Aire (ICA) para todas las estaciones de PM2.5 durante Marzo del 2018. . . . .	74
14.5. Concentración de PM2.5 durante el 06 y 08 de Marzo del 2018 en la estación MED-UNNV. . . . .	74
14.6. Concentración promedio mensual de PM2.5 para las estaciones del valle de Aburrá durante octubre del 2017 y 2018. . . . .	76
14.7. Índice de Calidad del Aire (ICA) para todas las estaciones de PM2.5 durante Octubre del 2017. . . . .	77
14.8. Índice de Calidad del Aire (ICA) para todas las estaciones de PM2.5 durante Octubre del 2018. . . . .	77
14.9. Precipitación nocturna entre el 10 y el 11 de Octubre del 2018. . . . .	78
14.10Ciclo diurno de la concentración de PM2.5 durante octubre del 2017 y 2018. . . . .	79

## Índice de Tablas

2.1. Distribución de equipos dentro de las estaciones de monitoreo de la REDMCA. . . . .	2
2.2. Fechas de instalación y desinstalación de equipos. . . . .	3
2.3. Ubicación geográfica de las estaciones de la red . . . . .	6
2.4. Ubicación geográfica de las estaciones de la red . . . . .	7
2.5. Clasificación de estaciones de acuerdo al tipo de zona (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2014)	7
2.6. Clasificación de estaciones de acuerdo al tipo de fuentes emisoras predominantes (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2014). . . . .	8
2.7. Clasificación de las estaciones. . . . .	9
2.8. Sector, subsector y estándares máximos de ruido ambiental para cada estación. . . . .	10
3.1. Porcentaje de datos válidos para los contaminantes . . . . .	11
3.1. Porcentaje de datos válidos para los contaminantes . . . . .	12
3.2. Puntos de corte del ICA . . . . .	13
4.1. Estadísticos de PM2.5 para el año 2018 en el municipio de Medellín. . . . .	20
4.2. Estadísticos de PM2.5 para el año 2018 en los municipios del área metropolitana, exceptuando Medellín. . . . .	21
5.1. Estadísticos de PM10 para el año 2018 en las estaciones automáticas. . . . .	27
5.2. Estadísticos 2018 PM10 para las estaciones manuales. . . . .	27
6.1. Estadísticos 2018 Ozono. . . . .	31
7.1. Estadísticos de NO <sub>2</sub> para el año 2018 en las estaciones de la REDMCA. . . . .	36
8.1. Estadísticos 2018 CO . . . . .	40
9.1. Estadísticos 2018 SO <sub>2</sub> . . . . .	44
10.1. Estadísticos 2018 PM1 para las estaciones manuales. . . . .	47
11.1. Porcentaje de datos válidos de la REDMCA (ruido ambiental) para 2018 . . . . .	49

11.2. Estadísticos 2018 para ruido ambiental diurno (Cantidad de muestras diurnas, número de excedencias a la norma diurna y promedio de los niveles de presión sonora corregido diurno). . . . .	52
11.3. Estadísticos 2018 para ruido ambiental nocturno (Cantidad de muestras nocturnas, número de excedencias a la norma nocturna y promedio de los niveles de presión sonora corregido nocturno). . . . .	52
12.1. Porcentaje de datos válidos Meteorología . . . . .	54
12.2. Estadísticos Precipitación . . . . .	60
15.1. Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA . . . . .	80
15.1. Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA . . . . .	81
15.1. Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA . . . . .	82
15.2. Método utilizado dentro de la red de ruido . . . . .	82

# 1 Introducción

---

El Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), es un proyecto de Ciencia y Tecnología y una estrategia para la gestión de riesgos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Alcaldía de Medellín, que cuenta con el apoyo y los aportes de EPM e ISAGEN.

El SIATA tiene como tarea fundamental alertar en tiempo real a los organismos gestores de riesgos y a la comunidad, frente a la posible ocurrencia de un fenómeno natural que pueda generar una emergencia, con este fin se realiza monitoreo en tiempo real de condiciones hidrometeorológicas de la región; desarrollo de modelos de pronóstico meteorológico e hidrológico, ajustados a las condiciones de la región; y entrega oportuna de información.

Desde el 1 de Agosto de 2016 el SIATA se constituye como operador de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (REDMCA), encargándose de la operación permanente de la red y garantizando la operación continua de la misma y la activación de protocolos de contingencia en caso de falla del sistema. De igual forma, debe apoyar de manera priorizada la gestión de eventos críticos relacionados con la calidad del aire de los municipios de la jurisdicción, entregando reportes de situaciones críticas de manera permanente y ante alteraciones de las condiciones ambientales de la región que puedan ser monitoreadas por el sistema.

Las condiciones meteorológicas han sido identificado como un elemento esencial para el pronóstico, entendimiento y planificación de la calidad del aire dentro de nuestra región metropolitana, siendo la atmósfera el medio donde se liberan, transportan y dispersan los contaminantes. La topografía irregular y pendiente del Valle de Aburrá favorece, bajo condiciones de estabilidad atmosférica, la acumulación de contaminantes dentro de la superficie, especialmente durante las primeras horas de la mañana y durante las horas posteriores al atardecer.

En este informe se presenta el análisis de los registros obtenidos de la REDMCA de contaminantes atmosféricos, meteorología y ruido ambiental para el año 2018. Igualmente se presenta el cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA), para cada uno de los contaminantes criterio monitoreados dentro del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En la sección de Anexos se adjuntan los métodos y rangos de operación de los equipos de la red de medición (Anexo 1).

## 2 Descripción de la red

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (REDMCA), estuvo constituida durante el 2018 por 45 puntos de monitoreo distribuidos en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Dirección: Carrera 53 # 40A-31, Contacto: Tel = +574 385 6000 ext. 419, Correo = gloria.ramirez@metropol.gov.co). Estos puntos de monitoreo están dotados de equipos automáticos y/o equipos manuales, los cuales permitieron hacer seguimiento de los contaminantes criterio, definidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), así como de los niveles de Ruido Ambiental. En la Tabla 2.1 se presentan las estaciones de la red por municipio y los equipos que estuvieron instalados a lo largo del 2018 o parte de él; en color azul oscuro se presentan aquellos equipos que no comunican al central, los cuales corresponden a equipos manuales de PM10 y PM2.5, así como a las estaciones de ruido ambiental.

MUNICIPIO	SIGLA	PARÁMETROS											
		PM1	Black Carbon	PM10 (S)	PM10	PM2.5 (S)	PM2.5	SO <sub>2</sub>	NOX	CO	O <sub>3</sub>	Met.	Ruido Ambiental
BARBOSA	BAR-HSVP			x									
	BAR-TORR						x						
	BAR-PDLA										x	x	
GIRARDOTA	GIR-IECO				x							x	
	GIR-BOTJ												x
	GIR-SOSN						x	x	x	x	x	x	x
COPACABANA	COP-HSMA			x									
	COP-CVID						x						
BELLO	BEL-SESB					x							
	BEL-USBV				x				x		x	x	
	BEL-FEVE						x						
MEDELLÍN	MED-ARAN						x						
	MED-ALTA						x						
	MED-BEME						x						
	MED-UNNV						x		x		x	x	
	MED-MIRA			x							x		
	CEN-TRAF				x		x		x			x	
	MED-EXSA				x								
	MED-ITMR				x				x				
	MED-UDEM										x	x	
	MED-CORA			x									
	MED-PLMA												x
	MED-PJIC	x		x	x	x			x	x		x	x
	MED-LAYE						x				x	x	
	MED-SCRI						x						
	MED-SIAT												x
	MED-TESO						x						
	MED-VILL						x						
ITAGÜÍ	ITA-PTAR			x									
	ITA-CJUS						x					x	
	ITA-POGO			x	x								
	ITA-CRSV			x	x								
	ITA-CONC				x		x				x	x	
	ITA-RESU					x							
ITA-CODI												x	
ENVIGADO	ENV-HOSP						x						
ESTRELLA	EST-MAGO			x									
	EST-HOSP						x						
SABANETA	SUR-TRAF	x	x	x	x		x		x	x		x	
	SAB-SEMS												x
	SAB-CAMS			x									
	SAB-JOFE						x						
CALDAS	SAB-RAME						x						
	CAL-JOAR			x	x								
	CAL-LASA						x				x	x	
<b>TOTALES</b>	<b>45</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>22</b>	<b>1</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>7</b>

Tabla 2.1: Distribución de equipos dentro de las estaciones de monitoreo de la REDMCA.

Durante el 2018 la red contó con un total de sesenta y cuatro (64) equipos automáticos ubicados en las diferentes estaciones de la Red, los cuales reportaron datos horarios para los gases monitoreados, material particulado PM10, PM2.5 y PM1, además de variables meteorológicas. Adicionalmente operaron siete (7) equipos automáticos con resolución minutal, los cuales conforman la red de ruido ambiental. Por otra parte, la red contó con trece (13) equipos semiautomáticos o manuales con resolución de muestreo de 24 horas.

Con el fin de complementar la información de calidad de aire obtenida en los diferentes puntos de monitoreo, se contó con trece (13) estaciones meteorológicas ubicadas en 7 de los 10 municipios del área metropolitana. A lo largo del año se cambiaron siete de estas estaciones marca *Met One* por estaciones meteorológicas marca *Thies*, con mejores especificaciones; en dichas estaciones se realizó el monitoreo de la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, precipitación y presión atmosférica. Las estaciones meteorológicas *Thies* no permiten hacer seguimiento de los datos de radiación solar global, no obstante, SIATA cuenta actualmente con una red de piranómetros instalados en varios puntos del Valle de Aburrá, la cual permite tener información más detallada acerca de los niveles de radiación en el valle.

En el desarrollo de las actividades propias de la REDMCA, se trasladaron varios equipos, y en el caso de las estaciones CAL-JOAR y SUR-TRAF, se instalaron equipos adicionales durante el año, así mismo, fue necesario suspender permanentemente la operación de algunos analizadores. La Tabla 2.2 muestra las fechas a partir de las que se obtuvieron los datos para las variables especificadas en cada estación, según el equipo instalado, además de las fechas hasta las cuales se tiene registro de las variables para los equipos cuya operación se suspendió.

	Estación	Variables	Fecha
Desinstaladas	CEN-TRAF	<b>NO</b>	2018-02-07
		<b>NO<sub>2</sub></b>	
		<b>NO<sub>x</sub></b>	
	ITA-CRSV	<b>PM10</b>	2018-06-14
		<b>PM10 (s)</b>	
	SUR-TRAF	<b>CO</b>	2018-08-17
	SAB-JOFE	<b>PM2.5</b>	2018-03-20
	SAB-CAMS	<b>PM10 (s)</b>	2019-01-29
CAL-JOAR	<b>PM10</b>	2018-06-11	
MED-PJIC	<b>PM1</b>	2018-04-03	
Instaladas	ITA-POGO	<b>PM10</b>	2018-06-22
		<b>PM10 (s)</b>	
	SUR-TRAF	<b>PM10</b>	2018-04-14
		<b>PM10 (s)</b>	2018-04-11
	SAB-RAME	<b>PM2.5</b>	2018-03-19
	CAL-JOAR	<b>PM2.5</b>	2018-02-24
SUR-TRAF	<b>PM1</b>	2018-04-10	

**Tabla 2.2:** Fechas de instalación y desinstalación de equipos.

Los siguientes fueron los cambios que se hicieron en las estaciones de la REDMCA durante el año 2018.

- En la estación **CEN-TRAF**, el equipo de NO<sub>x</sub> dejó de operarse a partir del mes de febrero luego

de múltiples dificultades técnicas que impidieron el correcto funcionamiento del analizador.

- La **estación ITA-CRSV** fue desinstalada en el mes de junio y trasladada a la **estación ITA-POGO** ubicada en la estación de Policía Los Gómez. Para la selección del nuevo sitio de instalación se tuvieron en cuenta las sugerencias hechas por personal de la Secretaria de Medio Ambiente del municipio de Itagüí.
- Durante el desarrollo de las verificaciones intermedias realizadas al equipo de CO de la **estación SUR-TRAF**, así como de las actividades de mantenimiento desarrolladas el mes de agosto, se identificaron inconsistencias en el funcionamiento de este, por lo cual se suspendió su operación para ser revisado con más detalle en las instalaciones de la torre SIATA. Durante las labores de revisión y diagnóstico de este analizador, se realizaron diversas actividades enfocadas en el mantenimiento correctivo, incluyendo pruebas de estabilidad así como cambios en las componentes internas, no obstante, el equipo no respondió a estas actividades, razón por la cual, y considerando además el tiempo de operación del equipo, se decidió suspender permanentemente su operación.
- La **estación SAB-JOFE** fue desinstalada a finales de marzo, y el equipo que operaba allí fue trasladado a la **estación I.E. RAFAEL J. MEJÍA (SAB-RAME)**.
- En las inmediaciones de la **estación SAB-CAMS** en el año 2018 se iniciaron adecuaciones de infraestructura, que obligaron a la reubicación de la estación debido a las afectaciones directas que el desarrollo de estas obras podrían generar en las mediciones de material particulado, consecuentemente el equipo de medición fue desinstalado y trasladado a la **estación SUR-TRAF** donde opera actualmente. En esta última se instaló además un equipo PM10 automático.
- El analizador de PM2.5 en la **estación CAL-JOAR** fue instalado el 19 de febrero del 2018, como parte de las actividades de densificación de la REDMCA. Por otra parte, el equipo automático BAM1020 con el que se hacía seguimiento de los niveles de PM10 en esta estación, suspendió su operación en el mes de junio como consecuencia del daño en una componente interna fundamental para el correcto funcionamiento de su sistema óptico.

La Red de Ruido Ambiental por otro lado, no presentó cambios en la ubicación de los sensores durante el año 2018.

El Anexo 1 contiene los diferentes métodos de medición de los equipos que hacen parte de la REDMCA, su rango de medición, estado de la muestra y los respectivos límites permisibles establecidos en la Resolución 2254 del 01 de noviembre del 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

La tabla 2.3 presenta la dirección acompañada de la latitud y la longitud de las estaciones que conformaron la Red de Calidad del Aire en seguimiento de los contaminantes criterio para el 2018.

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
<b>Barbosa</b>			
<b>BAR-HSVP</b>	Carrera 17 # 10 - 34	6.43917	-75.33633
<b>BAR-PDLA</b>	Carrera 48 # 70 - 10	6.40671	-75.41949
<b>BAR-TORR</b>	Calle 15 # 13 - 80	6.43696	-75.3304
<b>Girardota</b>			
<b>GIR-IECO</b>	Calle 5a # 14a - 62	6.37852	-75.44398

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
<b>GIR-SOSN</b>	Carrera 19 # 1064	6.37904	-75.45091

**Copacabana**

<b>COP-CVID</b>	Carrera 46b # 47a - 39	6.34536	-75.50475
<b>COP-HSMA</b>	Carrera 45 # 52 - 26	6.35272	-75.50822

**Bello**

<b>BEL-FEVE</b>	Carrera 58a # 52c - 135	6.3375655	-75.5678
<b>BEL-SESB</b>	Calle 45a # 49b - 56	6.3315	-75.556
<b>BEL-USBV</b>	Calle 45 # 61 - 40	6.3307	-75.56867

**Medellín**

<b>MED-ALTA</b>	Carrera 88a # 18a-5	6.22481	-75.61381
<b>MED-ARAN</b>	Calle 99 # 48 - 55	6.29346	-75.55643
<b>MED-BEME</b>	Carrera 86 # 34 - 97	6.243	-75.61201
<b>MED-CORA</b>	Carrera 65 # 44a - 32	6.2525	-75.58608
<b>MED-EXSA</b>	Calle 48 # 46 - 115	6.24933	-75.57025
<b>MED-ITMR</b>	Carrera 80 # 65 - 223	6.27556	-75.58829
<b>MED-LAYE</b>	Calle 16a sur # 9e - 300	6.18254	-75.55064
<b>CEN-TRAF</b>	Carrera 53 # 52 - 51	6.25256	-75.56958
<b>MED-PJIC</b>	Carrera 48 # 7 - 151	6.20897	-75.57777
<b>MED-MIRA</b>	Calle 40 # 21 - 03	6.22997	-75.54919
<b>MED-SCRI</b>	Carrera 131 # 62 - 15	6.2805	-75.6366
<b>MED-TESO</b>	Calle 1 # 29 - 300	6.1997788	-75.5614385
<b>MED-UDEM</b>	Carrera 87 # 30 - 65	6.23018	-75.60996
<b>MED-UNNV</b>	Calle 59a # 63 - 20	6.26337	-75.577
<b>MED-VILL</b>	Calle 66c # 39 - 93	6.26172	-75.55164

**Envigado**

<b>ENV-HOSP</b>	Diagonal 33 # 34c Sur 31	6.16849	-75.58197
-----------------	--------------------------	---------	-----------

**Itagüí**

<b>ITA-CJUS</b>	Carrera 52 # 74 - 67	6.18567	-75.59721
<b>ITA-CONC</b>	Carrera 64 # 25 - 01	6.1685	-75.64436

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
ITA-CRSV	Calle 52 # 48 - 12	6.17447	-75.61028
ITA-POGO	Calle 52 # 48 - 12	6.189723	-75.610588
ITA-PTAR	Calle 85 # 42 - 381	6.19364	-75.59158

**La Estrella**

EST-HOSP	Calle 83a Sur # 6045	6.15553	-75.64417
EST-MAGO	Calle 83b sur # 52 - 10	6.16092	-75.645

**Sabaneta**

SUR-TRAF	Calle 77sur # 49	6.15231	-75.62749
SAB-RAME	Carrera 45 # 77c sur 4	6.15678	-75.62137
SUR-CAMS	Carrera 45 # 78s -24	6.15553	-75.6195
SAB-JOFE	Carrera 46c # 76 sur - 37	6.15012	-75.62049

**Caldas**

CAL-JOAR	Carrera 51 # 127 sur - 41	6.09308	-75.63777
CAL-LASA	Carrera 51 # 118 sur - 57	6.09908	-75.63863

**Tabla 2.3:** Ubicación geográfica de las estaciones de la red

La Tabla 2.4 presenta la ubicación, latitud y longitud de las estaciones de monitoreo de ruido ambiental.

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
----------	-----------	---------	----------

**Girardota**

GIR-BOTJ	Carrera 15 # 6-05	6.38836	-75.440528
GIR-SOSN	Carrera 19 # 1064	6.37904	-75.45091

**Medellín**

MED-PJIC	Carrera 48 # 7-151	6.20897	-75.57777
MED-PLMA	Calle 41 # 55-80	6.22997	-75.54919
MED-SIAT	Calle 50 # 71-147	6.25922	-75.58864

**Itagüí**

ITA-CODI	Carrera 131 # 62-15	6.1691198	-75.6281967
----------	---------------------	-----------	-------------

ESTACIÓN	DIRECCIÓN	LATITUD	LONGITUD
<b>Sabaneta</b>			
<b>SAB-SEMS</b>	Carrera 45 # 72 Sur 25	6.15353	-75.61953

**Tabla 2.4:** Ubicación geográfica de las estaciones de la red

Las estaciones de la REDMCA son clasificadas según el tipo de zona donde se encuentran ubicadas y el tipo de fuentes emisoras predominantes en su área de influencia. Dicha clasificación se encuentra contenida dentro de la actualización de la clasificación de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2014) que se basa en el Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de Calidad del Aire (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) y se presentan a continuación:

Tipo de zona	Descripción
<b>Urbana</b>	Área totalmente urbanizada. Un área edificada no estará mezclada con áreas no urbanizadas, con la excepción de los parques urbanos
<b>Suburbana</b>	Área en gran parte urbana edificada, pero las áreas edificadas estarán mezcladas con áreas no urbanizadas (por ejemplo con áreas agrícolas, lagos, bosques, grandes zonas verdes, etc.)
<b>Rural</b>	Se define como áreas rurales todas aquellas que no satisfagan los criterios para áreas urbanas y suburbanas.

**Tabla 2.5:** Clasificación de estaciones de acuerdo al tipo de zona (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2014)

Tipo de área	Descripción
<b>De Tráfico</b>	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminante medido está determinando principalmente por emisiones del tráfico cercano.
<b>Punto Crítico</b>	Estaciones ubicadas a nivel de suelo de apoyo a estudios epidemiológicos.
<b>Industrial</b>	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminación medido este influenciado significativamente por las emisiones cercanas de fuentes industriales.
<b>Entorno de Fondo</b>	Estaciones ubicadas de manera que el nivel de contaminante medido no está significativamente influenciadas por fuentes o calle alguna, pero si por la contribución de las fuentes que influyen en estas estaciones debido al régimen de vientos.  Por ejemplo estaciones ubicadas en un centro urbano que está bajo la influencia indirecta del tráfico o procesos de combustión debido a la dirección del viento, o estaciones ubicadas en áreas rurales influenciadas por centros urbanos o áreas industriales debido al régimen de vientos.  También serán consideradas de fondo, estaciones que se encuentran vientos arriba de la fuente evaluada.

**Tabla 2.6:** Clasificación de estaciones de acuerdo al tipo de fuentes emisoras predominantes (Área Metropolitana del Valle de Aburra, 2014).

La categoría tendencia de mesoescala es adicionada además para estaciones ubicadas a una altura superior a 15 m en áreas urbanas del valle. Se presenta a continuación la clasificación de las estaciones pertenecientes a la red de monitoreo, teniendo como base la actualización de la clasificación de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2014).

Clasificación	Estación	Sigla
<b>Urbana de Tráfico</b>	Museo de Antioquia	CEN-TRAF
	Estación Tráfico Sur	SUR-TRAF
	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	MED-PJIC
<b>Urbana Industrial</b>	Casa de Justicia de Itagüí	ITA-CJUS
	Estación de Policía Los Gómez	ITA-POGO
	Institución Educativa María Goretti	EST-MAGO
<b>Urbana de Fondo</b>	Institución Educativa Colombia	GIR-IECO
	Universidad Nacional de Colombia, Núcleo el Volador	MED-UNNV
	La Estrella Hospital	EST-HOSP
	Barbosa Torre Social	BAR-TORR
	Copacabana Ciudadadela de la vida	COP-CVID
	Institución Educativa Ciro Mendía	MED-ARAN
	Biblioteca Fernando Botero	MED-SCRI
	Planta de Agua Potable de EPM	MED-VILL
	Institución Educativa Pedro Justo Berrío	MED-BEME
	Institución Educativa Pedro Octavio Amado	MED-ALTA
	Institución Educativa Inem Santa Catalina	MED-TESO
	Hospital Manuel Uribe Ángel Sede - Santa Gertrudis	ENV-HOSP
	Secretaría de Salud del Municipio de Bello	BEL-SESB
	Liceo Fernando Vélez	BEL-FEVE
	Institución Educativa Rafael J. Mejía	SAB-RAME
	Escuela Joaquín Aristizabal	CAL-JOAR
	Instituto Tecnológico Metropolitano - sede Robledo	MED-ITMR
<b>Urbana de Tendencia Mesoescala</b>	Corantioquia	MED-CORA
	Éxito San Antonio	MED-EXSA
	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando	ITA-PTAR
<b>Suburbana de Tráfico</b>	Universidad de Medellín	MED-UDEM
<b>Suburbana de Fondo</b>	Hospital San Vicente de Paul	BAR-HSVP
	Hospital Santa Margarita	COP-HSMA
	Universidad San Buenaventura	BEL-USBV
	Tanques Miraflores	MED-MIRA
	Tanques La Ye	MED-LAYE
	Concejo de Itagüí	ITA-CONC
	Corporación Universitaria Lasallista	CAL-LASA
<b>Rural de Fondo</b>	Parque de las Aguas	BAR-PDLA
	Santa Elena	MED-SELE
<b>Suburbana Industrial</b>	SOS Aburrá Norte	GIR-SOSN

Tabla 2.7: Clasificación de las estaciones.

Del mismo modo, las estaciones de medición de ruido ambiental son clasificadas dependiendo de sector en donde se ubiquen, el cual se designa en concordancia con el Plan de Ordenamiento Territorial de cada municipio. Diferente a la clasificación para las estaciones en seguimiento de los contaminantes criterio, las clasificaciones en ruido ambiental presentan restricciones normativas distintas para horarios

determinados; horario diurno (entre las 07:01 y 21:00) y nocturno (entre las 21:01 y 07:00). La Tabla 2.8 presenta el sector, el subsector y los niveles máximos permisibles de emisión de ruido en cada horario.

ESTACIÓN	SECTOR	SUBSECTOR	NORMA (dB)	
			DIURNA	NOCTURNA
<b>GIR-BOTJ</b>	<b>C</b>	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, discotecas, bingos, casinos	70	55
<b>GIR-SOSN</b>	<b>B</b>	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para el desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes	65	50
<b>MED-SIAT</b>	<b>C</b>	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, discotecas, bingos, casinos	70	55
<b>MED-PLMA</b>	<b>C</b>	Zonas con otros usos relacionados, como parque mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.	80	70
<b>MED-PJIC</b>	<b>B</b>	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.	65	50
<b>ITA-CODI</b>	<b>C</b>	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, discotecas, bingos, casinos	70	55
<b>SAB-SEMS</b>	<b>C</b>	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, discotecas, bingos, casinos	70	55

**Tabla 2.8:** Sector, subsector y estándares máximos de ruido ambiental para cada estación.

### 3 Generalidades de los Contaminantes

La Tabla 3.1 muestra el porcentaje de datos válidos para los distintos contaminantes medidos en las diferentes estaciones de monitoreo, mientras los equipos estuvieron en operación durante 2018. De acuerdo al Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire del MAVDT (Actual MADS), se establece que para el cálculo de los parámetros estadísticos es necesario contar con al menos el 75 % de información válida (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Las variables PM2.5(s) y PM10(s) en la Tabla 3.1 se refieren respectivamente al PM2.5 y PM10 medido mediante equipos manuales.

Tabla 3.1: Porcentaje de datos válidos para los contaminantes

Estaciones	PM2.5	PM10	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	PM1	PM2.5(s)	PM10(s)
BAR-HSVP											93.4
BAR-TORR	93.9										
BAR-PDLA						96.5					
GIR-SOSN	91.2		91.0	91.0	91.0	90.9	25.3	73.7			
GIR-IECO		93.5									
COP-HSMA											95.1
COP-CVID	96.0										
BEL-SESB											93.4
BEL-USBV		97.4	82.9	83.0	82.9	90.7					
MED-ARAN	97.2										
MED-SCRI	97.0										
MED-ITMR		95.4	86.1	86.1	86.1						
MED-UNNV	94.3		93.2	93.2	93.2	94.7					
MED-VILL	96.8										
CEN-TRAF	91.1	95.1	94.0	89.4	89.4						
MED-CORA											96.7
MED-EXSA		96.6									
MED-BEME	97.0										
MED-UDEM						95.6					
MED-MIRA						98.5					96.7
MED-ALTA	97.7										
MED-PJIC		96.9	97.3	97.2	97.2		96.0		94.8	92.7	95.8
MED-TESO	96.6										
ITA-PTAR											98.4

Tabla 3.1: Porcentaje de datos válidos para los contaminantes

Estaciones	PM2.5	PM10	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	PM1	PM2.5(s)	PM10(s)
ITA-POGO		97.6									96.9
ITA-CJUS	96.4		91.2	91.2	91.1						
MED-LAYE	95.5					99.2					
ITA-CRSV		94.2									98.2
ITA-CONC	95.4	95.0				96.3					
ENV-HOSP	97.8										
EST-MAGO											95.1
SAB-RAME	96.3										
EST-HOSP	98.2										
SUR-TRAF	95.6	79.4	88.6	88.6	88.6		49.8		88.6		97.7
SAB-JOFE	99.4										
CAL-LASA	97.6					93.9					
CAL-JOAR	96.9	90.7									92.6

Los resultados presentados en este informe se calculan a partir de las concentraciones sometidas a ensayo y muestreo durante el año 2018 por las estaciones manuales y automáticas, respectivamente. Los resultados de contaminantes criterio son comparados con la norma colombiana en unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , bajo condiciones de referencia. Los resultados del gas  $\text{NO}_x$  son reportados en  $\text{ppm}$ , al no tener factor de conversión a las unidades  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Al considerar los porcentajes de datos válidos reportados, los analizadores de  $\text{CO}$  y  $\text{SO}_2$  de la estación GIR-SOSN, fueron los únicos dos equipos en los que se obtuvo un porcentaje inferior al 75%; aunque se resalta que GIR-SOSN es una de las estaciones que contó con más equipos de monitoreo durante el año. En esta estación durante el mes de mayo, se realizaron adecuaciones en las instalaciones físicas de la cabina. Estas actividades implicaron apagar los equipos analizadores de gases, material particulado y meteorología durante las dos primeras semanas del mes, con el fin de garantizar la integridad de los mismos, además del correcto desarrollo de las labores de adecuación. Finalizadas las adecuaciones, los equipos se instalaron y se estabilizaron para la posterior verificación, según lo establecido en los procedimientos del sistema de gestión de calidad.

Los datos de  $\text{SO}_2$  para el mes de mayo, junio y julio, obtenidos después de las verificaciones, presentaron comportamiento anómalo respecto a la serie histórica de esta variable, razón por la cual se invalidaron; el equipo tuvo que ser desinstalado para su reparación hasta el mes de agosto.

De igual forma después de las adecuaciones realizadas en el mes de mayo, los datos de la variable  $\text{CO}$  se identificaron como erróneos en las actividades de verificación del equipo, por lo que se suspendió su operación y fue trasladado al Laboratorio de Pruebas y Análisis con el fin de realizar un diagnóstico más detallado del equipo. Este equipo permaneció fuera de operación durante el resto del año.

## Índice de Calidad del Aire (ICA)

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es un indicador adimensional que oscila entre 0 y 500, se desarrolla con el propósito de informar a la comunidad sobre el estado de la calidad del aire y advertir sobre posibles riesgos a la salud ante la exposición a una atmósfera contaminada, dividiéndose en las siguientes categorías y colores que representan la calidad del aire: bueno (verde), moderado (amarillo), dañino para la salud de grupos sensibles (naranja) y dañino para la salud (rojo) (U.S. Environmental Protection Agency, 2014). La Tabla 3.2 presenta los puntos de corte del ICA para las diferentes clasificaciones de acuerdo a lo establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

ICA	COLOR	CLASIFICACIÓN	O <sub>3</sub> 8h µg/m <sup>3</sup>	O <sub>3</sub> 1h µg/m <sup>3</sup>	PM10 24h µg/m <sup>3</sup>	PM2.5 24h µg/m <sup>3</sup>	CO 8h µg/m <sup>3</sup>	SO <sub>2</sub> 24h µg/m <sup>3</sup>	NO <sub>2</sub> 1h µg/m <sup>3</sup>
0-50	Verde	Buena	0-106	--	0-54	0-12	0-5094	0-93	0-100
51-100	Amarillo	Aceptable	107-138	--	55-154	13-37	5095-10819	94-197	101-189
101-150	Naranja	Dañina a la salud de grupos sensibles	139-167	245-323	155-254	38-55	10820-14254	198-486	190-677
151-200	Rojo	Dañina a la salud	168-207	324-401	255-354	56-150	14255-17688	487-797	678-1221
201-300	Morado	Muy dañina a la salud	208-393	402-794	355-424	151-250	17689-34862	798-1583	1222-2349
301-500	Marrón	Peligrosa	394	795-1185	425-604	251-500	34863-57703	1584-2629	2350-3853

**Tabla 3.2:** Puntos de corte del ICA

## 4 Material Particulado menor a 2.5 $\mu m$ (PM2.5)

El Material Particulado menor a 2.5  $\mu m$  (PM2.5) es uno de los contaminantes criterio que tienen más impacto en la calidad del aire de nuestra región metropolitana; además de ser uno de los más perjudiciales para la salud de las personas, debido a su capacidad para penetrar en las regiones más profundas del sistema respiratorio (Jaime and Vasco, 2008). El PM2.5 es clave para establecer el estado de calidad del aire de la región, y en consecuencia es definido como indicador de episodios críticos.

La red de calidad del aire contó a lo largo del 2018 con 22 estaciones con equipos de monitoreo automático de PM2.5, ubicadas en los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá; las estaciones SAB-JOFE, SAB-RAME y CAL-JOAR no presentan registro de la totalidad del año, ya que fueron instaladas o desinstaladas a lo largo de él. La estación SAB-JOFE cuenta con un poco menos de 4 meses de datos, siendo el registro de datos más corto.

La Figura 4.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones automáticas de PM2.5:

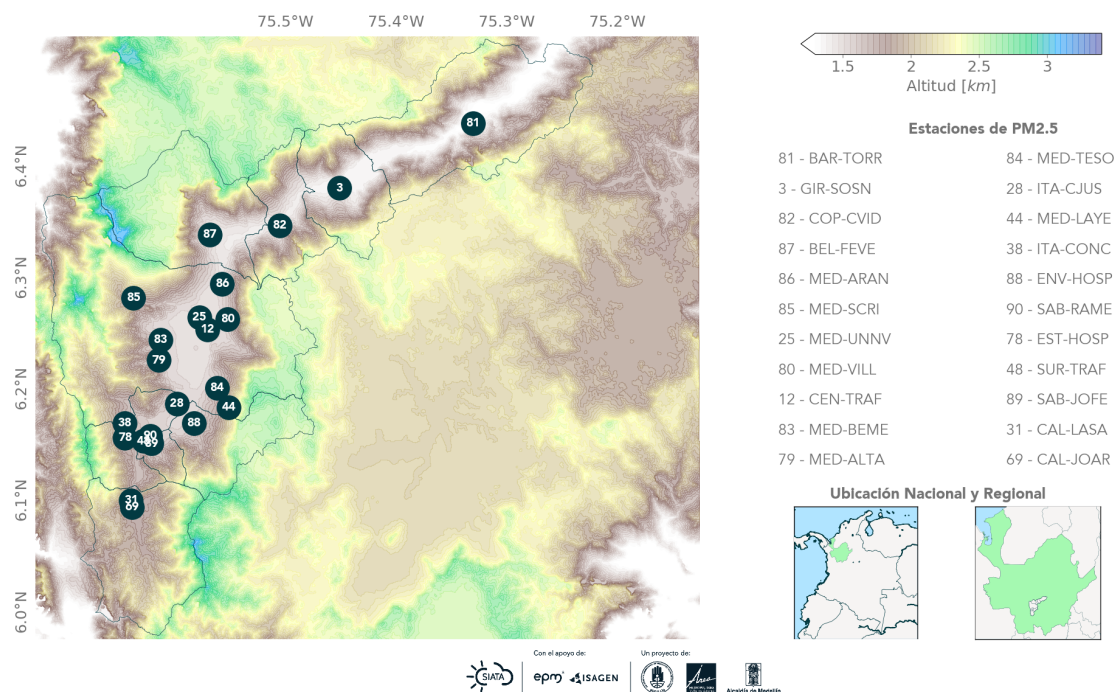


Figura 4.1: Estaciones automáticas de monitoreo de PM2.5.

las cuales se encuentran ubicadas en 2 municipios del área metropolitana. La Figura 4.2 presenta el mapa con la ubicación geográfica de estas estaciones. Por otra parte, en el municipio de Itagüí se realizó

una campaña de monitoreo de PM<sub>2.5</sub> en la unidad residencial Reservas del Sur, estación ITA-RESU. Los resultados de esta campaña no se incluyen en el presente informe.

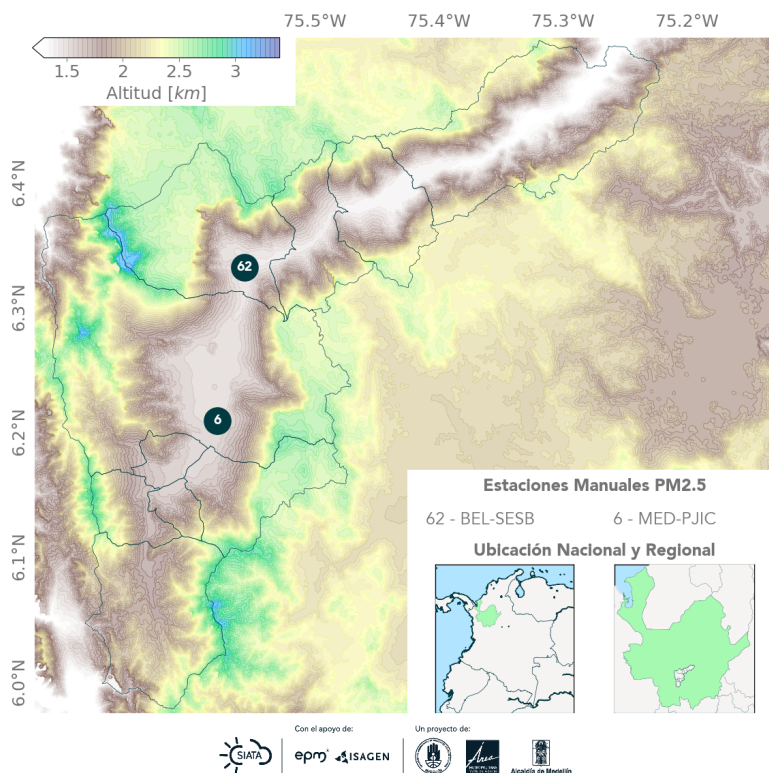


Figura 4.2: Estaciones manuales de monitoreo de PM<sub>2.5</sub>.

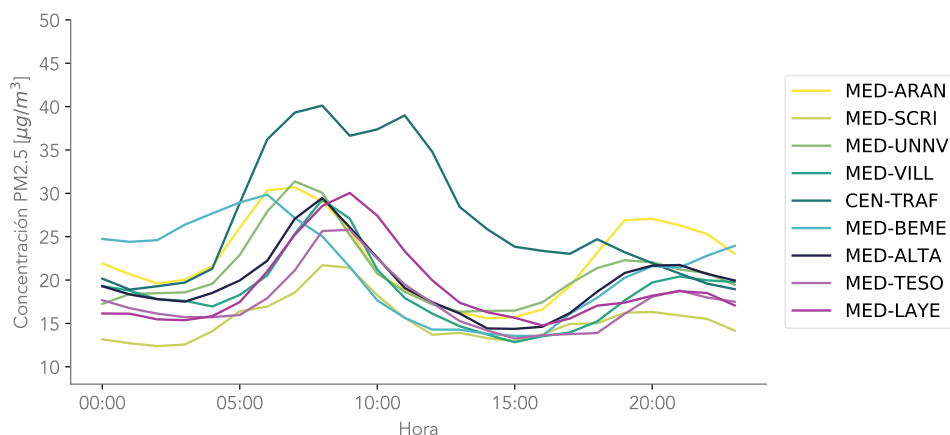
## Ciclo diario de la concentración de PM<sub>2.5</sub>

Las Figuras 4.3 y 4.4 presentan respectivamente el ciclo diario de la concentración de PM<sub>2.5</sub> para las diferentes estaciones de monitoreo automático ubicadas en Medellín, y en el resto de los municipios del Valle de Aburrá. En general puede observarse un comportamiento típico bimodal de las concentraciones a lo largo del día, con un periodo de mayor concentración de partículas entre las 6:00 y las 10:00 y uno un poco menos pronunciado entre las 19:00 y las 23:00.

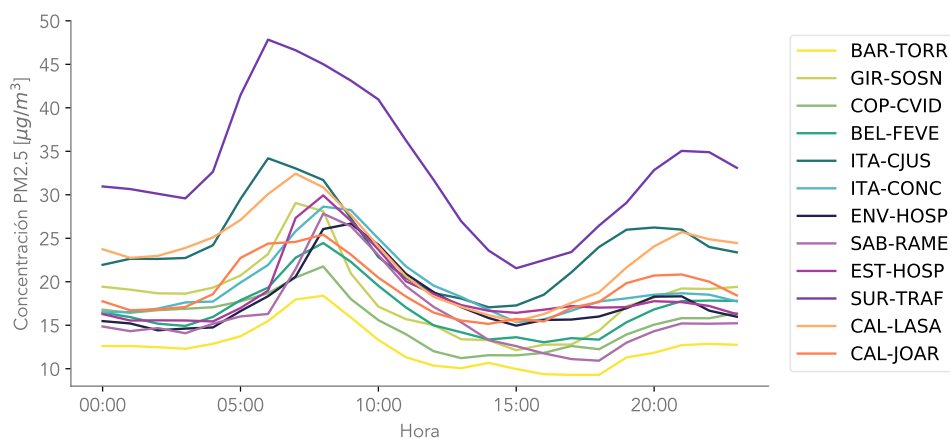
Dicho comportamiento es más pronunciado en las estaciones ubicadas al sur del Área Metropolitana, en especial para la estación SUR-TRAF (ver Figura 4.4), la cual está fuertemente influenciada por los efectos del tráfico. El ciclo bimodal podría ser explicado por el comportamiento meteorológico de la zona y la dinámica de movilidad dentro del área metropolitana. Las horas del día en las cuales se presenta mayor concentración de partículas con diámetro menores a 2.5 micrómetros corresponden a las horas en donde la superficie de la atmósfera aún no ha sido calentada por los efectos de la radiación solar, impidiendo la dispersión y el ascenso de contaminantes a la atmósfera libre; a esa condición se le llama estabilidad atmosférica, y favorece la acumulación de contaminantes en la superficie. A medida que la superficie se calienta, los contaminantes pueden ser removidos de la capa límite atmosférica, logrando las mínimas concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en horas de la tarde.

Sumado a este efecto se encuentra la dinámica de movilidad que se desarrolla en la ciudad. Las horas

de máxima concentración de PM2.5 corresponden también a las horas pico de movilidad, las cuales se caracterizan por un alto flujo vehicular, identificado como una de las principales fuentes emisoras de partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$ .



**Figura 4.3:** Ciclo diario de PM2.5 para las estaciones automáticas ubicadas en el municipio de Medellín  
 Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.



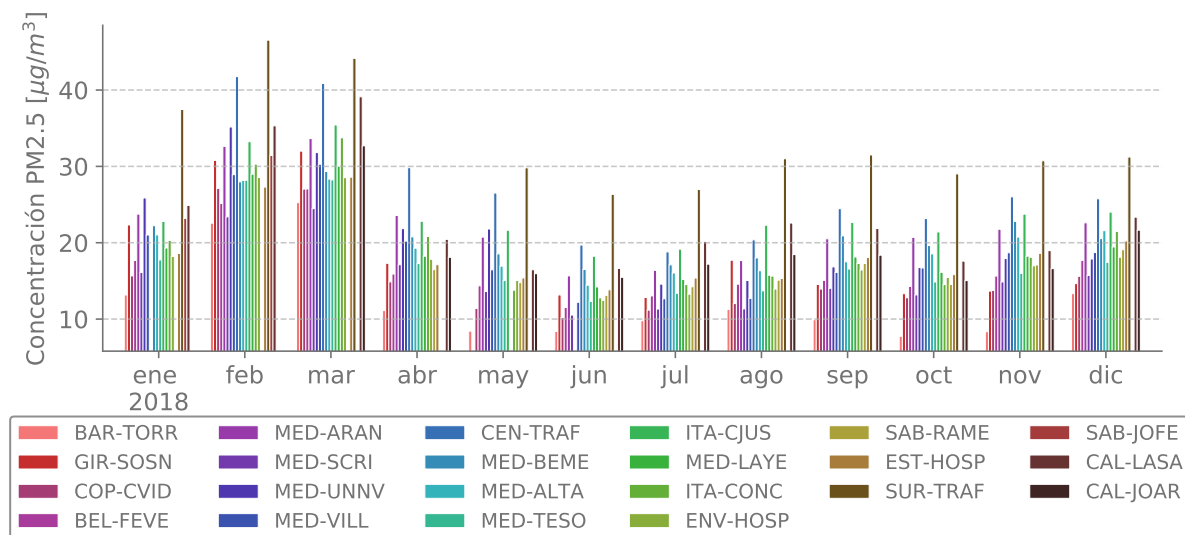
**Figura 4.4:** Ciclo diario de PM2.5 para las estaciones automáticas ubicadas en los municipios del valle de Aburrá, exceptuando Medellín.  
 Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

### Ciclo anual de la concentración de PM2.5

La Figura 4.5 presenta el promedio mensual de las concentraciones de PM2.5, para las estaciones que alcanzaron el 75 % de los datos válidos durante cada mes. En la Figura se observa la tendencia compartida entre las diferentes estaciones de la red, con un máximo entre febrero y marzo, meses en los cuales se da la transición entre el periodo seco y de lluvias en la región andina colombiana. En dicho periodo la

atmósfera presenta principalmente condiciones estables como resultado de la presencia cuasi-permanente de nubes de baja altura sobre el valle, lo cual disminuye la radiación incidente e impide el desarrollo de una capa de mezcla convectiva que permita el ascenso de contaminantes por encima del tope de las montañas, para su posterior remoción.

El mes de octubre también es identificado como un mes de transición, sin embargo, no alcanza las concentraciones observadas en los anteriores meses. Por otro lado, la época seca presenta las condiciones propicias para la dispersión de contaminantes.

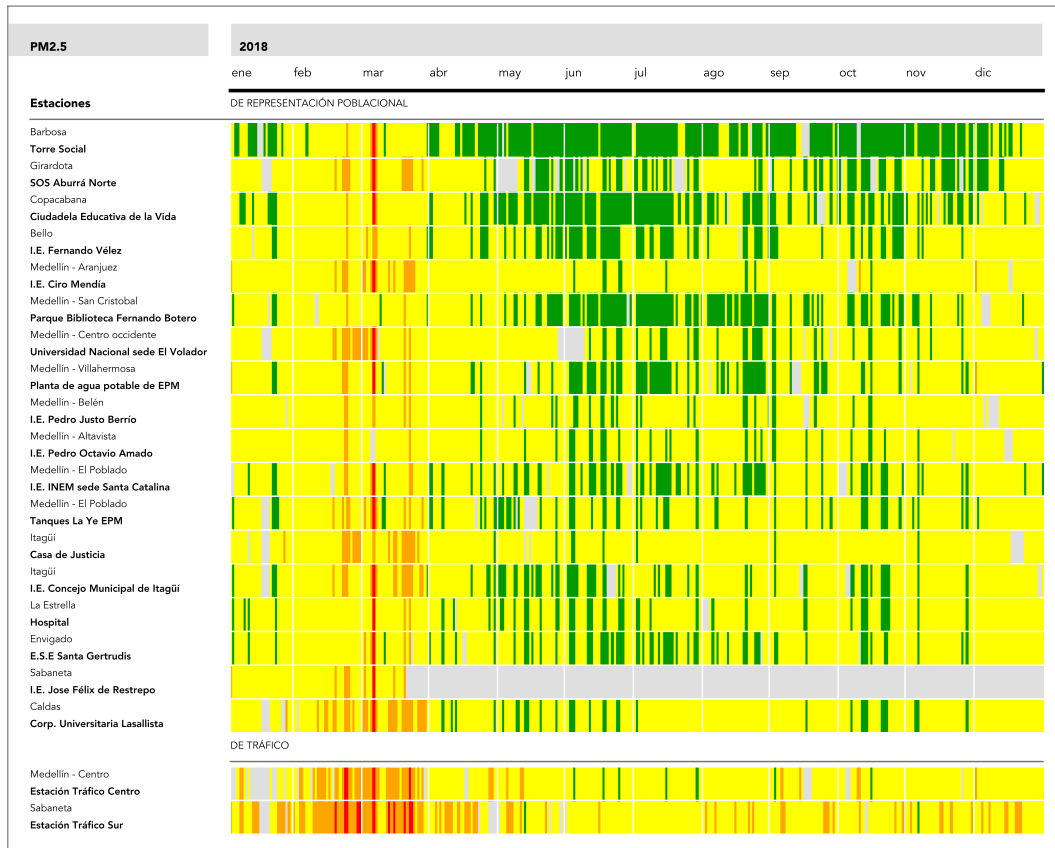


**Figura 4.5:** Ciclo anual del PM2.5 para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá.

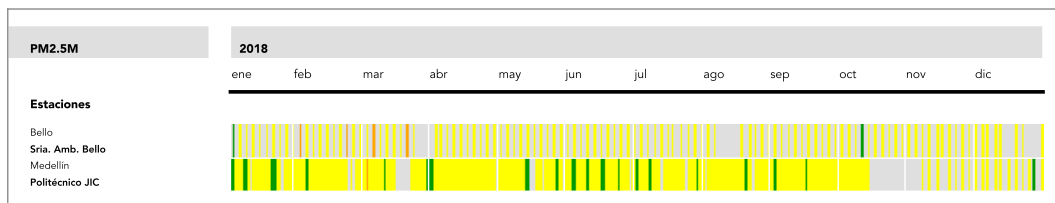
## Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM2.5 durante el 2018

A continuación se aplica la descripción del ICA presentada en la sección 3. Las Figuras 4.6 y 4.10 muestran la variación del ICA para las diferentes estaciones de monitoreo automáticas y manuales durante el año 2018. Puede observarse como la mayoría de estaciones presentaron valores de ICA equivalentes a la clasificación aceptable (amarillo), seguido por ICA bueno (verde). Los meses de febrero, marzo y abril, fueron los meses en que las estaciones permanecieron por más tiempo en una categoría mayor del índice (dañina a la salud de grupos sensibles).

Las estaciones de tráfico en especial, presentaron mayoritariamente clasificación ICA aceptables y dañina a la salud de grupos sensibles a lo largo del año.



**Figura 4.6:** Índice de Calidad del Aire durante el año 2018 para las estaciones automáticas de PM2.5



**Figura 4.7:** Índice de Calidad del Aire durante el año 2018 para las estaciones manuales de PM2.5

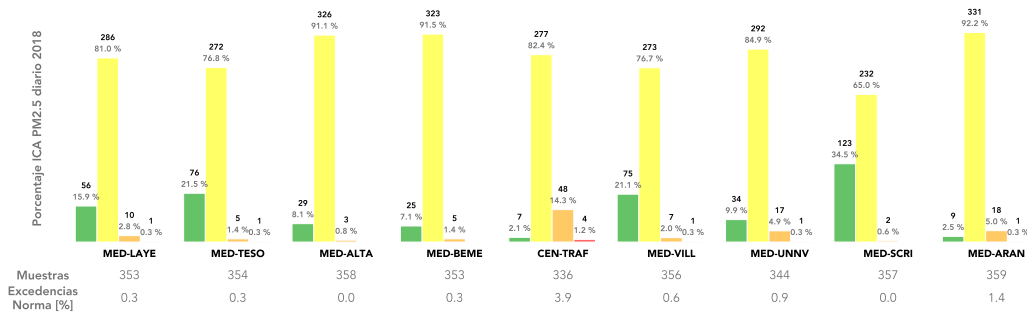
Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran un resumen de la información presentada en el gráfico anterior. En estas figuras se reporta el porcentaje y el número de días en los que los registros de cada estación en el municipio de Medellín (Figura 4.8) o en los demás municipios del área metropolitana (figura 4.9) se clasificaron en las diferentes categorías del ICA.

Las Figuras resumen del ICA, presentan también el porcentaje de excedencias a la norma colombiana durante el 2018. Para el cálculo de estas excedencias se tuvo en cuenta el cambio en el nivel máximo permisible establecido, a partir del 01 de julio de 2018, en la Resolución 2254 de 2017; en este sentido,

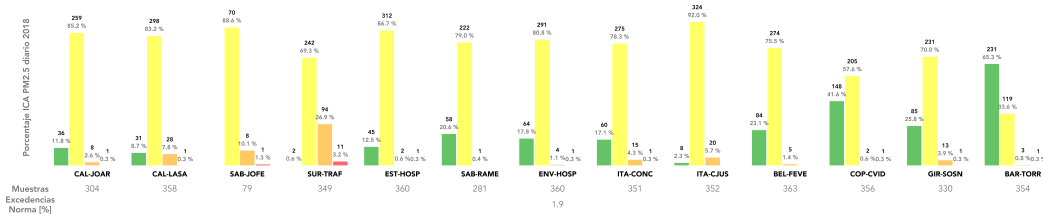
para el primer semestre del año, se consideró un nivel máximo permisible para PM<sub>2.5</sub> igual a 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para el segundo semestre del año, el nivel máximo permisible se consideró igual a 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

La estación SUR-TRAF (estación de tráfico) es a grandes rasgos la estación con mayor número de excedencias a la norma diaria de PM<sub>2.5</sub>, con un porcentaje del registro anual de 14.6%. Esta misma estación, fue la que presentó mayor número de días clasificados con ICA dañino a la salud; las demás estaciones presentaron a lo sumo 1 día con esta clasificación.

La estación BAR-TORR es la única con datos mayoritariamente clasificados como Buenos, en un 65.3% de los días.



**Figura 4.8:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones de PM<sub>2.5</sub> para el municipio de Medellín.

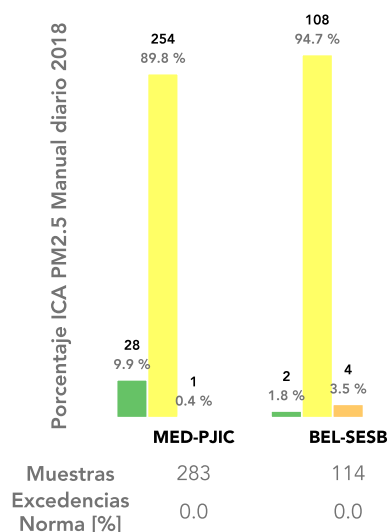


**Figura 4.9:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones de PM<sub>2.5</sub> ubicadas en los municipios del valle de Aburrá, exceptuando Medellín.

En la Figura 4.10, se muestra el resumen ICA para el año 2018 de las estaciones manuales de PM<sub>2.5</sub> que hacen parte de la red de monitoreo de calidad del aire. El método de medición de estos equipos implica una resolución de muestreo de 24 horas.

En la estación MED-PJIC operó, hasta el mes de octubre, un equipo semiautomático con frecuencia de monitoreo diaria. En este mes, se realizó un cambio en el equipo de medición, pasando de un equipo *Partisol*, con frecuencia de muestreo diaria a un equipo *PQ200*, para el cual la frecuencia de muestreo es de cada 3 días. Esta última también es la frecuencia de muestreo del equipo ubicado en la estación BEL-SESB.

Los registros de las estaciones manuales no alcanzan la categoría dañina para la salud en ningún momento del año.



**Figura 4.10:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones manuales de PM2.5

### Estadísticos de PM2.5 para el 2018

Las Tablas 4.1 y 4.2 presentan los valores medios, mínimos y máximos diarios de la concentración de PM2.5 para cada una de las estaciones tanto semiautomáticas como automáticas en el municipio de Medellín y en los demás municipios del valle, durante el año 2018. Como es posible observar, la concentración diaria máxima durante el año se presentó en la estación SUR-TRAF con un valor igual a  $76.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la concentración mínima diaria se registró en la estación BAR-TORR con un valor de  $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Finalmente las estaciones de tráfico CEN-TRAF y SUR-TRAF excedieron la normal anual colombiana de PM2.5, igual a  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

	MED-ARAN	MED-VILL	MED-SCRI	MED-UNNV	CEN-TRAF	MED-BEME	MED-ALTA	MED-PJIC(M)	MED-TESO	MED-LAYE
CMD	357	354	355	344	333	351	357	283	352	353
MAX	60.7	58.5	40.1	57.9	68.6	46.8	44.5	38.3	58.6	69.2
MEDIA	22.4	18.6	15.4	20.8	27.0	21.2	19.8	20.2	17.5	19.0
MIN	10.3	6.9	6.4	7.3	10.7	9.7	8.1	7.0	5.9	4.2
NEND	5	2	0	3	13	1	0	2	1	1

**Tabla 4.1:** Estadísticos de PM2.5 para el año 2018 en el municipio de Medellín.

	BAR-TORR	GIR-SOSN	COP-CVID	BEL-FEVE	BEL-SESB(M)	ITA-CJUS	ENV-HOSP	ITA-CONC	SUR-TRAF	EST-HOSP	CAL-LASA	CAL-JOAR	SAB-RAME	SAB-JOFE
CMD	350	330	354	362	114	351	360	351	346	360	357	302	280	79
MAX	58.9	64.6	57.0	55.1	40.9	55.4	56.7	60.1	76.0	56.7	71.4	59.8	38.7	60.2
MEDIA	12.4	18.2	15.4	16.7	21.3	23.9	17.8	19.4	33.2	18.7	23.0	19.1	16.2	28.3
MIN	4.7	5.6	6.7	7.1	11.3	10.6	7.3	4.8	10.9	7.1	5.4	5.8	6.2	12.9
NEND	1	3	1	1	4	1	1	3	51	1	3	1	0	1

**Tabla 4.2:** Estadísticos de PM2.5 para el año 2018 en los municipios del área metropolitana, exceptuando Medellín.

## 5 Material Particulado menor a 10 $\mu m$ (PM10)

El Material Particulado menor a 10  $\mu m$  (PM10) es uno de los contaminantes criterio monitoreado por la REDMCA. De acuerdo a la última actualización del inventario de emisiones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las emisiones de PM10 están asociadas principalmente a las fuentes fijas, siendo el sector textil y de confecciones, los sectores con mayor aporte (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015).

La red de calidad del aire tuvo una cobertura de 11 estaciones de monitoreo automático de PM10 a lo largo del año, las cuales realizan monitoreo continuo cada hora mediante un equipo BAM1020 de la marca Met-One, ubicadas en 6 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Las estaciones ITA-CRSV, CAL-JOAR, ITA-POGO y SUR-TRAF, no presentan registro de todo el año debido a que sólo operaron parte de él (ver Tabla 2.2).

La Figura 5.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones automáticas de PM10 que operaron durante el año 2018:

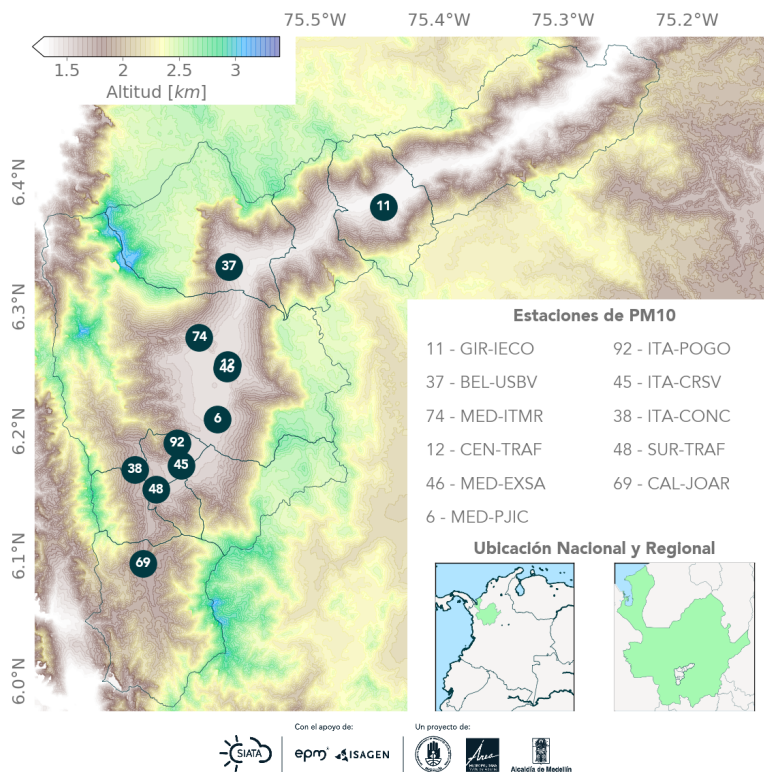


Figura 5.1: Estaciones automáticas de monitoreo de PM10.

Se contó además con un total de 12 estaciones manuales para el seguimiento de los niveles de PM10, distribuidas en 7 municipios del área metropolitana. Las estaciones ITA-CRSV, SAB-CAMS, ITA-POGO y SUR-TRAF, no tienen registro de la totalidad del año dado los cambios que se hicieron en la distribución de las estaciones de la red durante el año. La estación SAB-CAMS únicamente tiene registro del mes de enero.

La Figura 5.2 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las estaciones manuales de PM10:

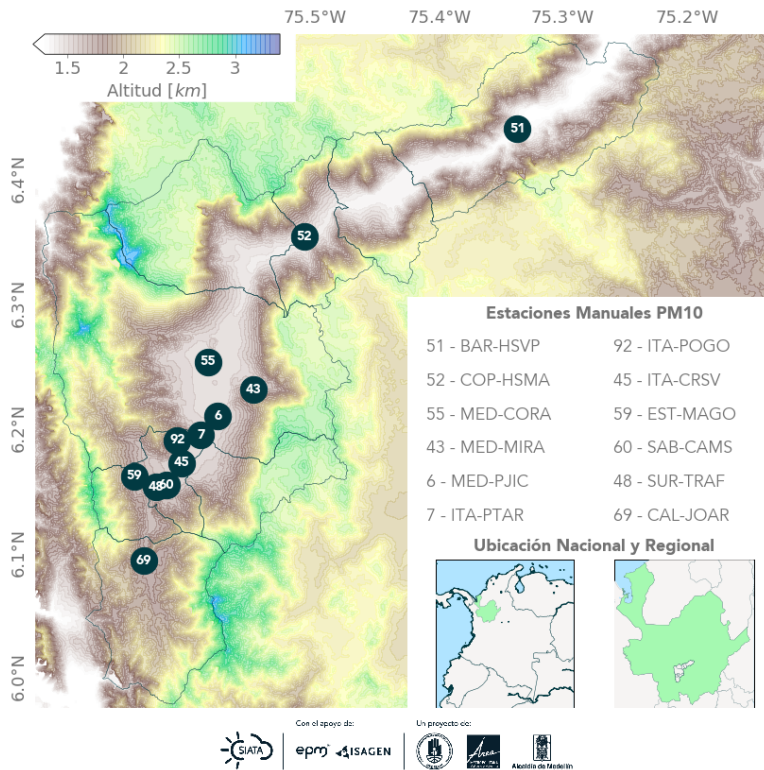
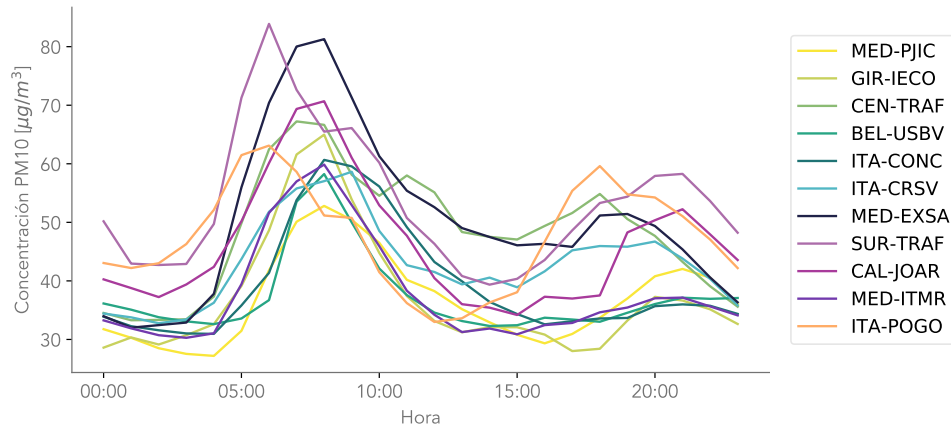


Figura 5.2: Estaciones manuales de monitoreo de PM10.

### Ciclo diurno de la concentración de PM10

La Figura 5.3 presenta el ciclo diurno de la concentración de PM10 para las diferentes estaciones de monitoreo automático. Para el PM10, al igual que para el PM2.5, se conserva en todas las estaciones el pico máximo de concentración en las primeras horas de la mañana y un pico máximo de menor concentración al rededor de las 19:00. Esto podría relacionarse al igual que para el PM2.5 a las características meteorológicas de la región y a las dinámicas de movilidad del área metropolitana.

El pico de la mañana es más pronunciado en consecuencia a la estabilidad atmosférica remanente de la noche; mientras que a las 19:00, se cuenta con una atmósfera remanente inestable.

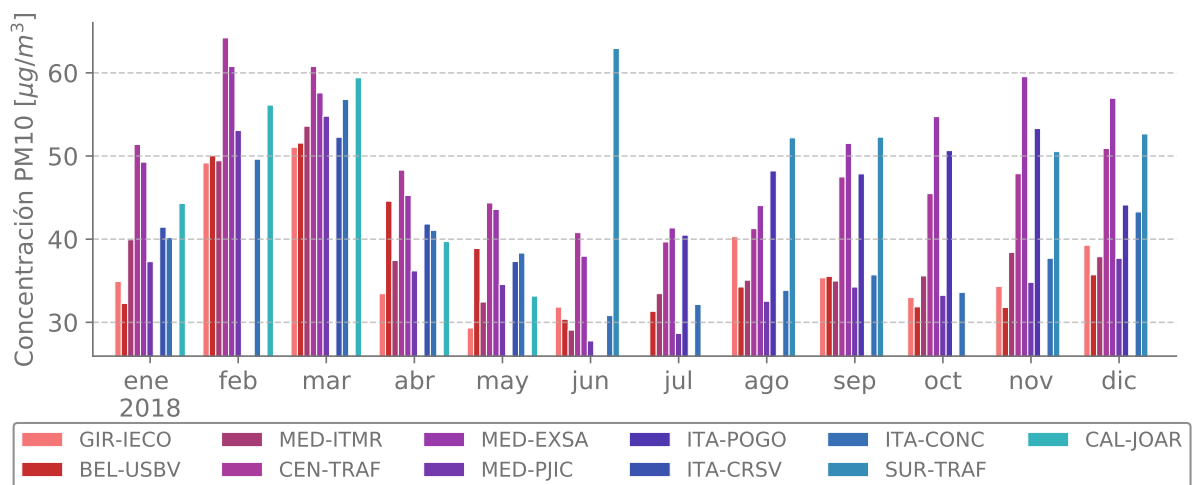


**Figura 5.3:** Ciclo diario de PM10 para las estaciones automáticas.

Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

### Ciclo anual de la concentración de PM10

La Figura 5.4 presenta el ciclo anual del PM10 durante el año 2018. A diferencia del PM2.5, el ciclo anual del PM10 demuestra mayor bimodalidad, al pronunciarse las concentraciones de octubre y noviembre; En particular, para las estaciones ubicadas en el centro del municipio de Medellín, estaciones CEN-TRAF y MED-EXSA. Como se muestra, las concentraciones mensuales más bajas para el PM10 se registraron en la estación MED-PJIC, con un mínimo en el mes de Junio de  $27.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y un máximo de  $54.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , registrado en el mes de marzo. Así mismo, el máximo mensual se registró en la estación SUR-TRAF con  $64.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el caso de las las estaciones poblaciones, la concentración promedio mensual máxima, obtenida en la estación MED-EXSA, fue igual a  $60.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 5.4:** Ciclo Anual del PM10 para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá.

## Índice de Calidad del Aire (ICA) para el PM10

Las Figuras 5.5 y 5.6, muestra la variación del ICA para las diferentes estaciones automáticas y manuales de PM10 durante el año 2018. Puede observarse como la mayoría de estaciones presentaron valores de ICA equivalentes a la clasificación buena (verde). Para ninguna estación se obtuvo valores de ICA que se clasificaran como dañinos para la salud de grupos sensibles ó dañinos para la salud.

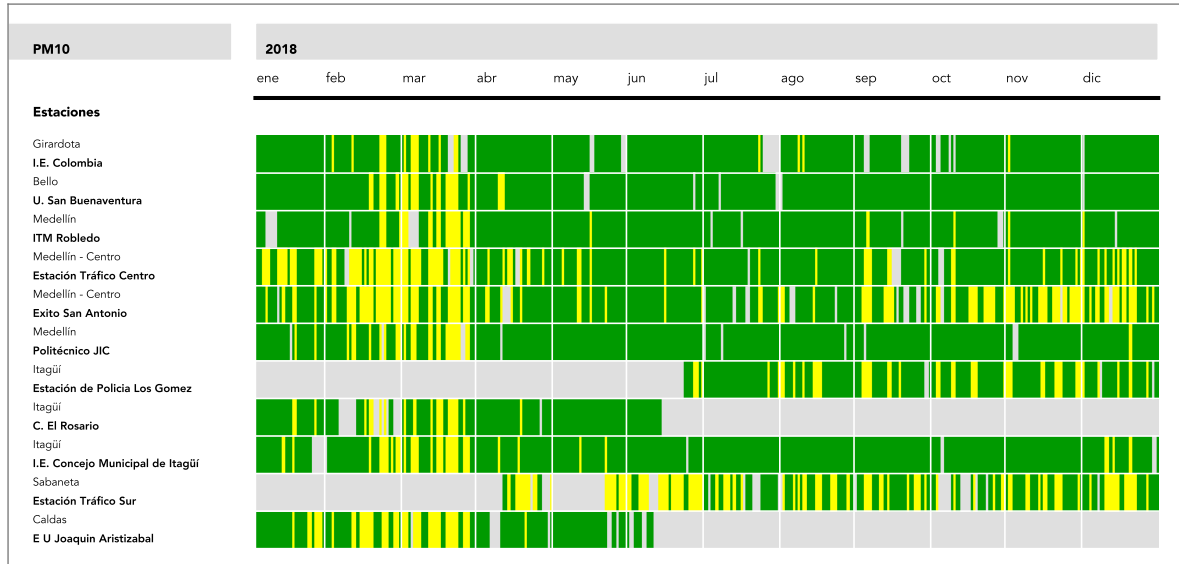


Figura 5.5: Índice de Calidad del Aire para las estaciones automáticas de PM10 durante el 2018.

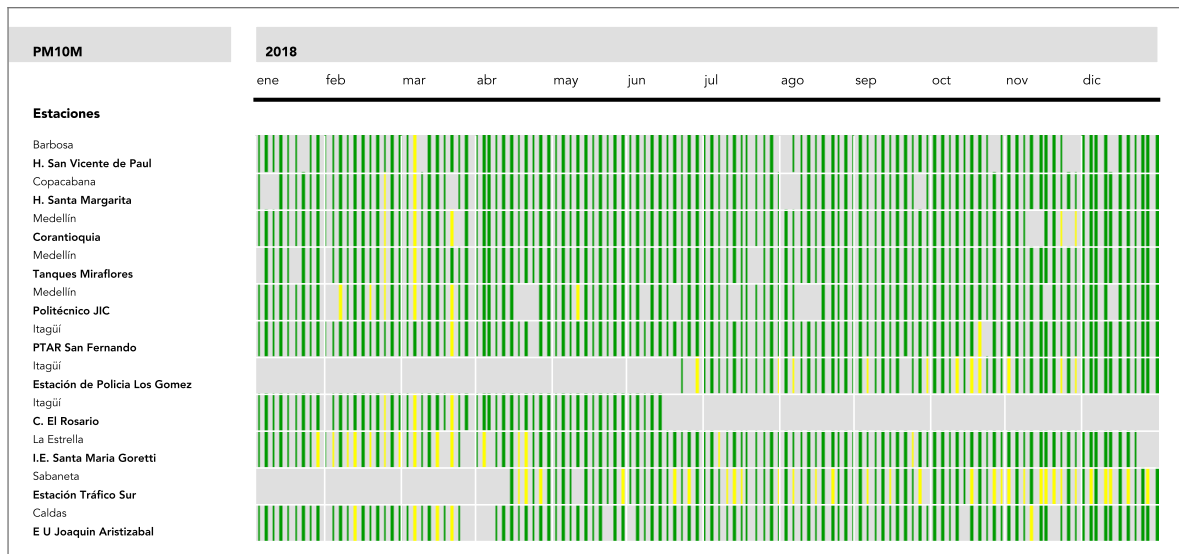
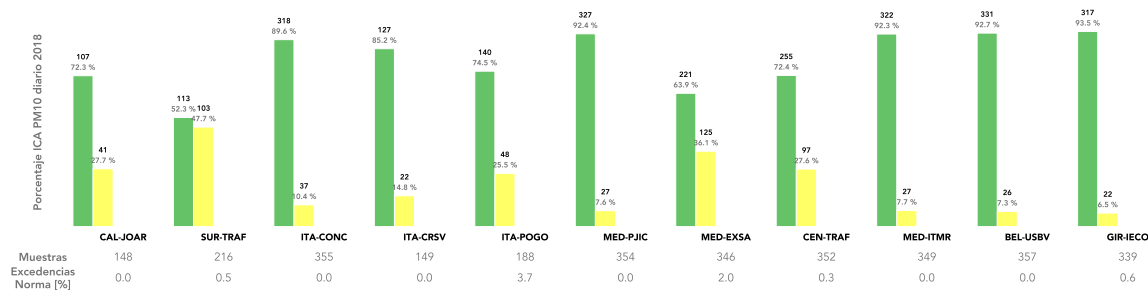


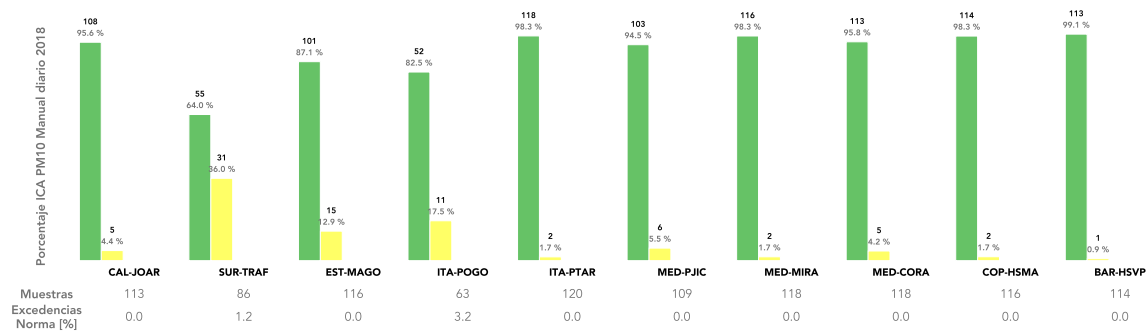
Figura 5.6: Índice de Calidad del Aire para las estaciones semiautomáticas de PM10 durante el 2018.

En las Figuras 5.7 y 5.8, puede observarse un resumen de la información presentada en los gráficos anteriores en reporte del ICA, con el porcentaje de días que cada estación obtuvo para cada clasificación. En la Figura se destaca que la única estación con porcentajes de datos equiparables clasificados según el ICA como buenos y aceptables, fue la estación SUR-TRAF, sin embargo hay que tener en cuenta que el equipo fue instalado a mediados del mes de abril del 2018. Para las demás estaciones las diferencias entre las categorías exceden el 25 %.

Las Figuras presentan además el porcentaje de excedencias a la norma colombiana durante el 2018 para cada una de las estaciones. El cálculo de estas excedencias se realizó de acuerdo a la cantidad de días en los que se cumpliera el 75 % de datos válidos, así mismo, se tuvo en cuenta el cambio en el nivel máximo permisible establecido, a partir del 01 de julio de 2018, en la Resolución 2254 de 2017; en este sentido, para el primer semestre del año, se consideró un nivel máximo permisible para PM10 igual a 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que para el segundo semestre del año, el nivel máximo permisible se consideró igual a 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 5.7:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones automáticas de PM10 durante el 2018



**Figura 5.8:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para las estaciones manuales de PM10 durante el 2018

### Estadísticos de PM10 para el 2018

Las Tablas 5.1 y 5.2 presentan los valores medios, mínimos y máximos de los niveles de PM10 para cada una de las estaciones automáticas y manuales, respectivamente. Como se observa, la máxima concentración diaria de PM10 durante el 2018 se presentó en la estación CEN-TRAF, con un valor de 106.6

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que el valor más bajo, igual a  $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se presentó en la estación BAR-HSVP. Las estaciones que mayor número de excedencias a la norma diaria presentaron fueron las estaciones ITA-POGO, equipo automático, y MED-EXSA, con 7 días cada una. Cabe recordar que la estación ITA-POGO fue instalada en el mes de junio del 2018.

La estación MED-EXSA fue la única que en cumplimiento del 75% de los datos válidos para el 2018, excedió la norma anual de concentración máxima de PM10 (en  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); al registrar un promedio anual de  $50.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

	GIR-IECO	BEL-USBV	MED-ITMR	CEN-TRAF	MED-EXSA	MED-PJIC	ITA-POGO	ITA-CRSV	ITA-CONC	SUR-TRAF	CAL-JOAR
CMD	337	356	344	350	344	352	188	148	353	213	147
MAX	90.5	86.2	72.3	106.6	91.0	83.4	86.9	74.0	93.3	85.0	93.7
MEDIA	37.2	37.3	37.9	48.3	50.3	36.9	47.6	43.1	39.4	53.6	46.2
MIN	17.4	19.5	15.5	21.3	20.6	13.6	19.3	16.7	15.0	26.3	17.4
NEND	2	0	0	1	7	0	7	0	0	1	0

**Tabla 5.1:** Estadísticos de PM10 para el año 2018 en las estaciones automáticas.

El equipo manual en ITA-POGO reportó menor número de excedencias a la norma diaria en comparación al equipo automático, no obstante, se debe tener en cuenta que el equipo manual tiene una frecuencia de muestreo de 3 días.

	BAR- H SVP(M)	COP- H SMA(M)	MED- C ORA(M)	MED- M IRA(M)	MED- PJIC(M)	ITA- PT AR(M)	ITA- PO GO(M)	ITA- CR SV(M)	EST- M AGO(M)	SUR- T RAF(M)	CAL- J OAR(M)
CMD	114	116	118	118	109	120	63	54	116	86	113
MAX	60.6	69.4	63.0	57.6	72.4	57.1	75.4	63.0	78.3	79.3	67.0
MEDIA	23.6	30.7	32.8	28.2	35.3	33.2	42.1	39.4	40.2	49.7	34.2
MIN	8.4	11.1	14.3	11.7	12.7	11.7	15.2	18.3	16.1	23.6	13.4
NEND	0	0	0	0	0	0	2	0	2	1	0

**Tabla 5.2:** Estadísticos 2018 PM10 para las estaciones manuales.

## 6 Ozono ( $O_3$ )

El ozono troposférico es un contaminante secundario de la atmósfera (originados en el aire por la interacción de uno o más contaminantes, o condiciones naturales de la atmósfera) que presenta una importancia significativa en la Calidad del Aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, esto debido a las condiciones topográficas, meteorológicas y al alto flujo vehicular característico de la zona, que favorecen su producción y concentración en la superficie.

La red de calidad del aire contó con 9 estaciones de monitoreo automático de Ozono, que permanecieron operativas a lo largo del año, ubicadas en 6 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La Figura 6.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones automáticas de Ozono.

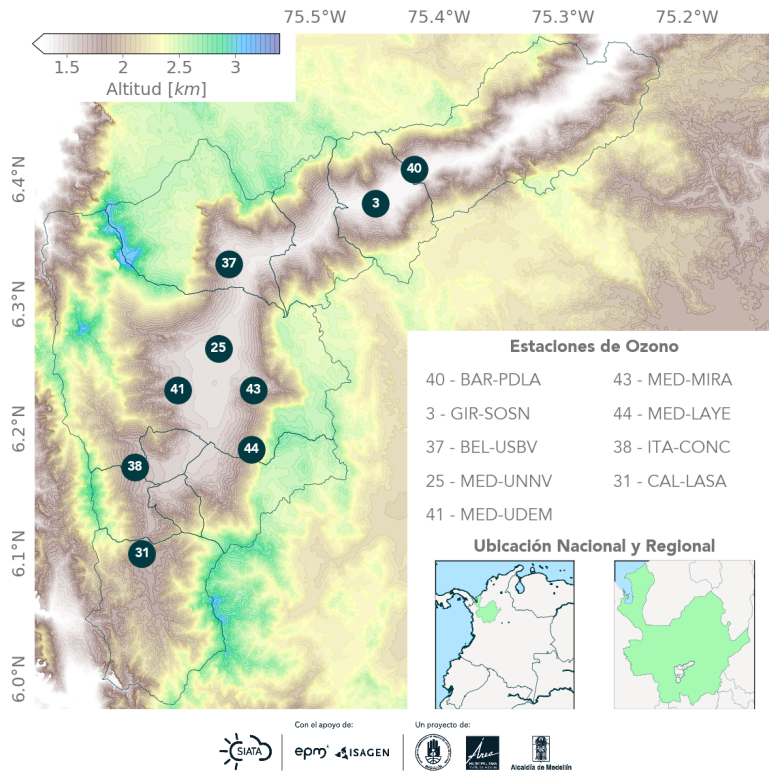
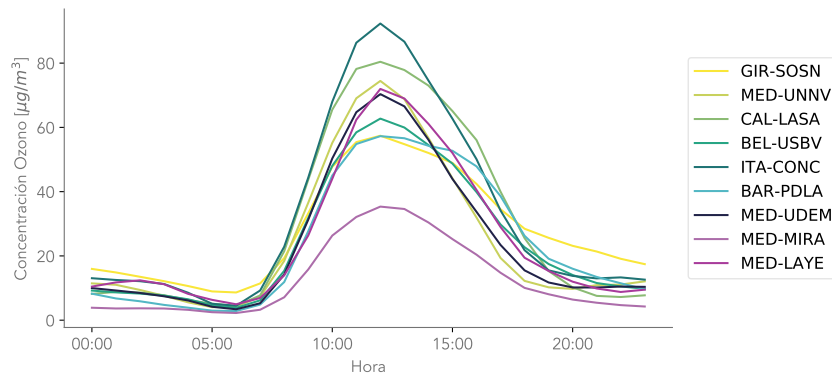


Figura 6.1: Estaciones automáticas de monitoreo de Ozono

## Ciclo diario de la concentración de Ozono

La Figura 6.2 presenta el ciclo diario de la concentración de Ozono para las diferentes estaciones de monitoreo automático durante el año 2018. Puede observarse como existe un comportamiento similar en cada una de las gráficas, las cuales presentan un ciclo unimodal para la concentración de ozono a lo largo del día, presentando su pico máximo cerca del medio día.

Este comportamiento unimodal tan marcado en las concentraciones de ozono es explicado principalmente por el ciclo diario de la radiación solar. Para la formación de ozono a nivel troposférico se necesitan básicamente dos condiciones: la presencia de óxidos de nitrógeno o compuestos orgánicos volátiles dentro de la atmósfera y la presencia de luz solar. A medida que la luz solar incide sobre la atmósfera las moléculas de  $\text{NO}_2$  son disociadas mediante fotólisis en  $\text{NO}$  y una molécula de Oxígeno atómico, esta última reacciona con las moléculas de Oxígeno ( $\text{O}_2$ ) presentes en la atmósfera para formar Ozono a nivel troposférico. Es por tal motivo que a medida que se incrementa la radiación en la superficie, se incrementa la concentración de ozono y a medida que la radiación disminuye la concentración de ozono también disminuye. Todo esto puede comprobarse en la Figura 6.2.

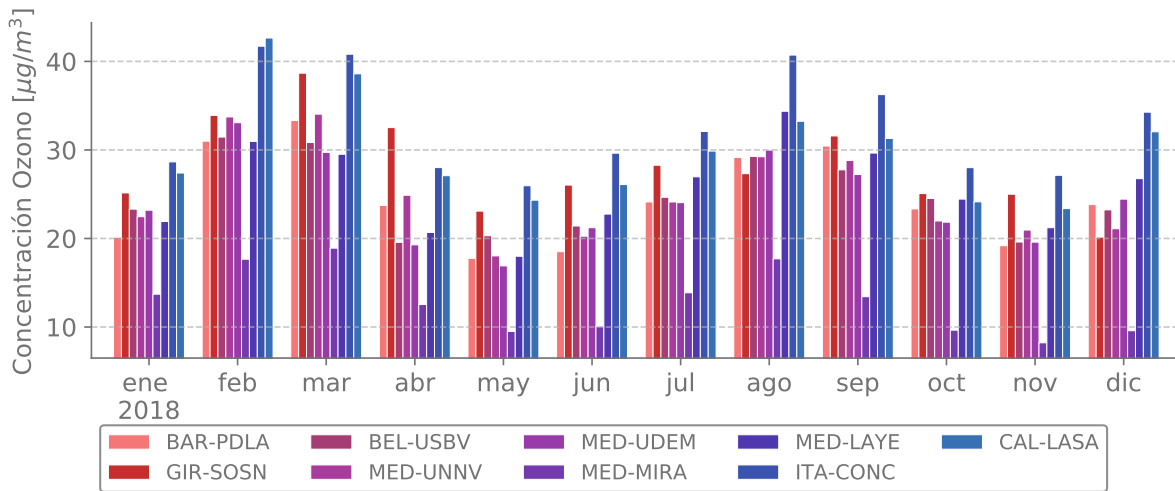


**Figura 6.2:** Ciclo diario de Ozono para las estaciones automáticas  
Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

## Ciclo anual de la concentración de Ozono

Como se puede observar en la Figura 6.3, del mismo modo que con el ciclo diario, la variabilidad anual de las concentraciones de ozono se relacionan estrechamente con la variabilidad de la incidencia de la radiación solar sobre la superficie, la cual es desfavorecida por la cobertura de nubosidad semi permanente en los meses de transición (seca-lluviosa) y en los periodos de mayor precipitación.

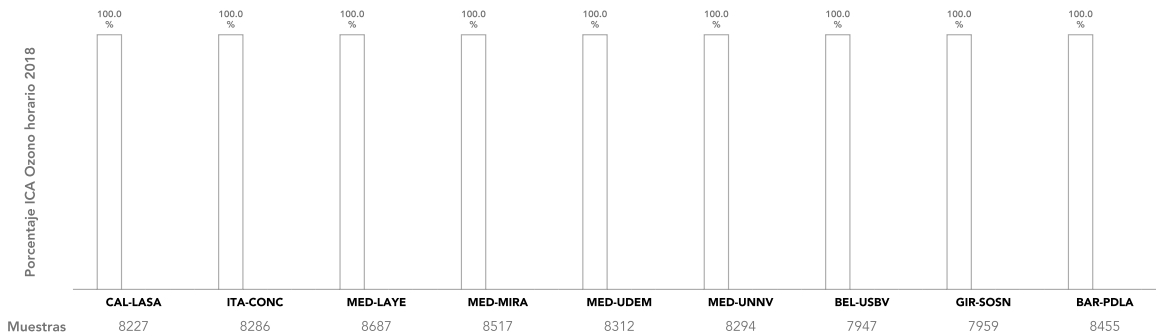
Los máximos de radiación incidente sobre superficie son registrados los meses de febrero y agosto (ver Sección 11); mismos meses donde se obtienen las máximas concentraciones de ozono.



**Figura 6.3:** Ciclo Anual del Ozono para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá.

### Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias y octohorarias

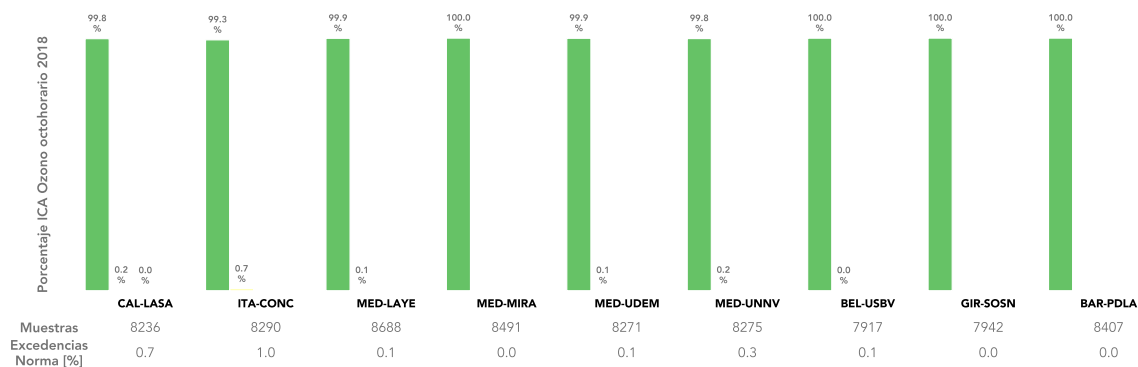
El porcentaje del ICA asociado a ozono horario en las diferentes estaciones durante el año 2018 se muestra en la Figura 6.4. Ninguna estación registró concentraciones horarias superiores a  $245 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tal que se alcanzaran las diferentes categorías de calidad de aire asociadas a este contaminante.



**Figura 6.4:** Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones horarias de Ozono

La Figura 6.5 muestra el porcentaje del ICA para el ozono octohorario en las diferentes estaciones durante el año 2018. La calidad de aire asociada al ozono octohorario, en todas las estaciones en las que se monitorea este contaminante, fue fundamentalmente buena durante todo el año.

En cuanto al porcentaje de excedencia de la norma octohoraria, igual a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , definida para ozono en la Resolución 2254 de 2017, la estación ITA-CONC presentó el mayor porcentaje de excedencias, igual a 1.0%. En esta estación, durante 22 días del año se presentó por lo menos una excedencia a la norma octohoraria (ver Tabla 6.1).



**Figura 6.5:** Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones octohorarias de Ozono

### Estadísticos de Ozono para el 2018

En la Tabla 6.1 se presenta un resumen estadístico de los niveles de ozono monitoreados en las diferentes estaciones de la REDMCA durante el año 2018. Las estaciones BAR-PDLA y MED-MIRA fueron las únicas estaciones en las que no se presentaron excedencias a la norma octohoraria durante el 2018, siendo MED-MIRA la estación con las concentraciones promedio octohorarias y máximas octohorarias más bajas. La máxima concentración octohoraria, igual  $140,4\mu g/m^3$ , se registró en la estación CAL-LASA. La máxima concentración octohoraria promedio anual, igual a  $32,7\mu g/m^3$ , se obtuvo en la estación ITA-CONC.

	BAR-PDLA	GIR-SOSN	BEL-USBV	MED-UNNV	MED-UDEM	MED-MIRA	MED-LAYE	ITA-CONC	CAL-LASA
MEDIA	24.7	28.2	24.6	25.0	24.1	12.9	25.6	32.7	30.0
VM8H	97.6	101.4	110.1	123.0	115.3	89.2	124.3	128.6	140.4
NEN8H	0	1	1	8	2	0	3	22	20

**Tabla 6.1:** Estadísticos 2018 Ozono.

## 7 Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ )

La suma entre el Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) y el Oxido de Nitrógeno ( $\text{NO}$ ) se conoce como los Óxidos de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), ambas moléculas forman juntas una familia química. El  $\text{NO}$  es el óxido de nitrógeno que más se forma durante los procesos de combustión, mientras que el  $\text{NO}_2$  es emitido en pequeñas cantidades. El  $\text{NO}_2$  también se forma dentro de la atmósfera por los procesos de oxidación del  $\text{NO}$ , pudiendo alcanzar concentraciones considerables en áreas altamente contaminadas.

La red de calidad del aire contó con 8 estaciones de monitoreo automático de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$  durante el año 2018. El analizador de  $\text{NO}_x$  de la estación CEN-TRAF salió de operación en el mes de Febrero. El seguimiento al contaminante se hizo en 5 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La Figura 7.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones:

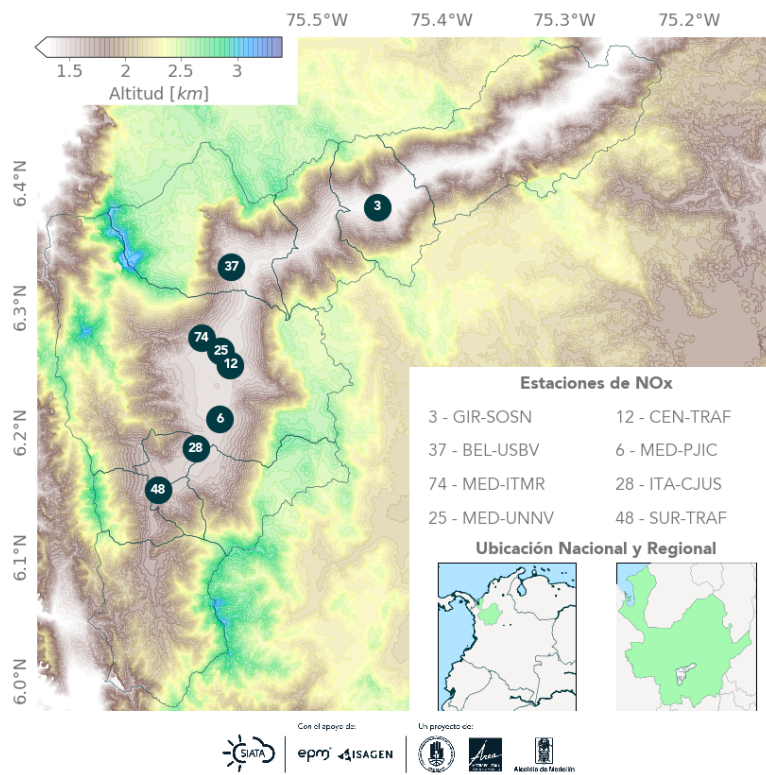


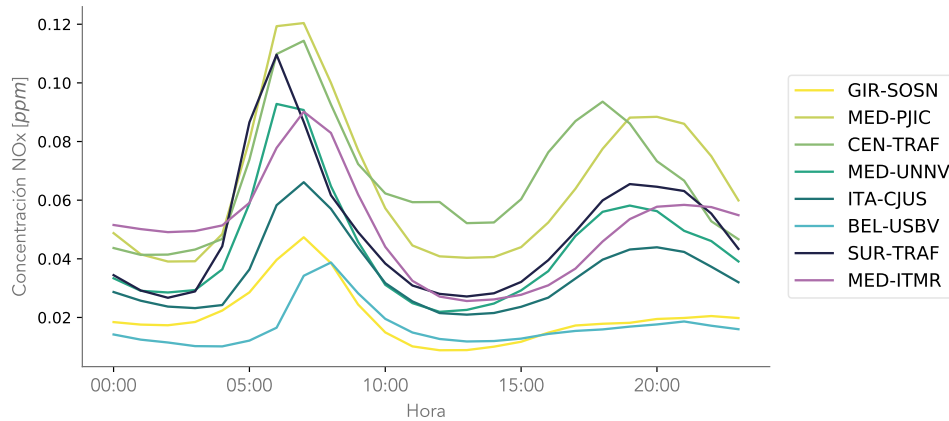
Figura 7.1: Estaciones automáticas de monitoreo de  $\text{NO}_x$

Los dióxidos de Nitrógeno son de especial interés dado su papel esencial en la formación de ozono troposférico, además de representar un riesgo para la población pudiendo afectar las funciones respiratorias mediante la irritación del tracto respiratorio.

### Ciclo diario de la concentración de $\text{NO}_x$

La Figura 7.2 presenta el ciclo diario de la concentración de  $\text{NO}_x$  para las diferentes estaciones. Puede observarse como existe un comportamiento similar en cada una de las gráficas, las cuales presentan un ciclo bimodal para la concentración de  $\text{NO}_x$  a lo largo del día, con un periodo de mayores concentraciones entre las 6:00 y las 10:00 y uno, un poco menos pronunciado, entre las 19:00 y las 23:00.

Para lograr comprender el comportamiento diario de los  $\text{NO}_x$ , es necesario mencionar algunas características importantes en la química de estos contaminantes. En primer lugar, durante el día el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{NO}$  se interconvierten mediante el ciclo fotoquímico de los  $\text{NO}_x$ , sin embargo durante la noche el  $\text{NO}_2$  no puede dividirse por fotólisis, y por tanto la química de la familia  $\text{NO}_x$  resulta ser muy diferente, el  $\text{NO}$  reacciona con el  $\text{O}_3$  para formar  $\text{NO}_2$ , y este último a su vez reacciona con el  $\text{O}_3$  para formar  $\text{NO}_3$ , es por tal motivo que se espera que las concentraciones de ambos contaminantes sea mucho menor en la noche que en el día, y que a su vez la concentración del  $\text{NO}$  sea menor que la del  $\text{NO}_2$ . Otro aspecto importante para el entendimiento del ciclo diario es el papel de la meteorología, pues como ya se ha mencionado anteriormente la estabilidad juega un papel muy importante en la mezcla y dispersión de contaminantes, por tal motivo es de esperarse que en las horas de la tarde se presenten las mínimas concentraciones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}$ .



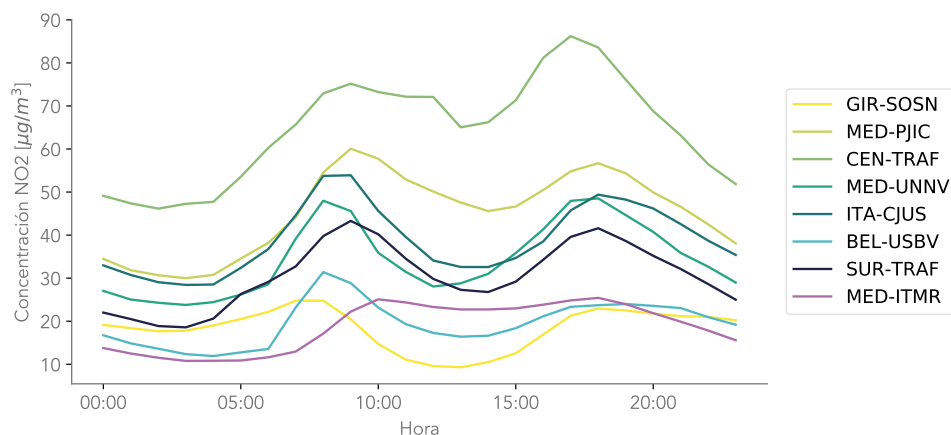
**Figura 7.2:** Ciclo diario de  $\text{NO}_x$  para las estaciones automáticas.

Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

### Ciclo diario de la concentración de $\text{NO}_2$

La Figura 7.3 presenta el ciclo diario de la concentración de  $\text{NO}_2$  para las diferentes estaciones. Puede observarse que la mayoría de las estaciones presentan un comportamiento bimodal para la concentración de  $\text{NO}_2$  a lo largo del día, con máximos alrededor de las 09:00 y las 17:00.

Para entender el comportamiento del ciclo diario de este contaminante se remite a la explicación del ciclo diario de los  $\text{NO}_x$  en la sección 7.

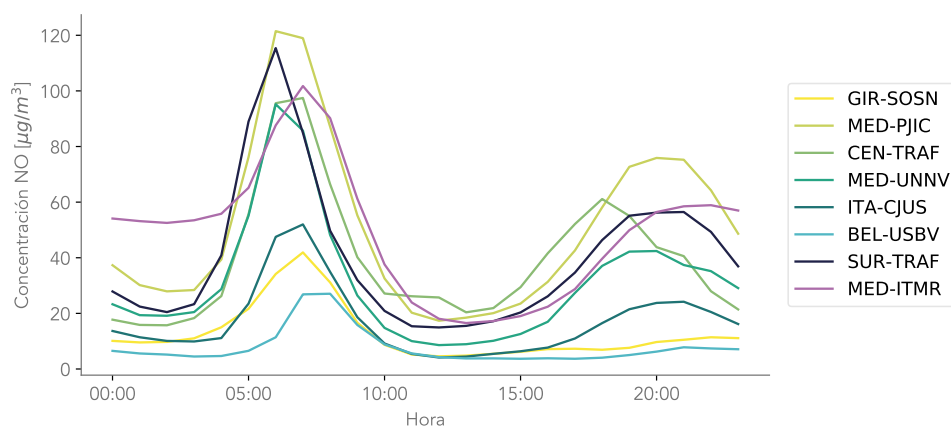


**Figura 7.3:** Ciclo diario de NO<sub>2</sub> para las estaciones automáticas  
Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

### Ciclo diario de la concentración de NO

La Figura 7.4 presenta el ciclo diario de la concentración de NO para las diferentes estaciones de monitoreo automático. Puede observarse como existe un comportamiento similar en cada una de las estaciones, presentándose un comportamiento principalmente bimodal.

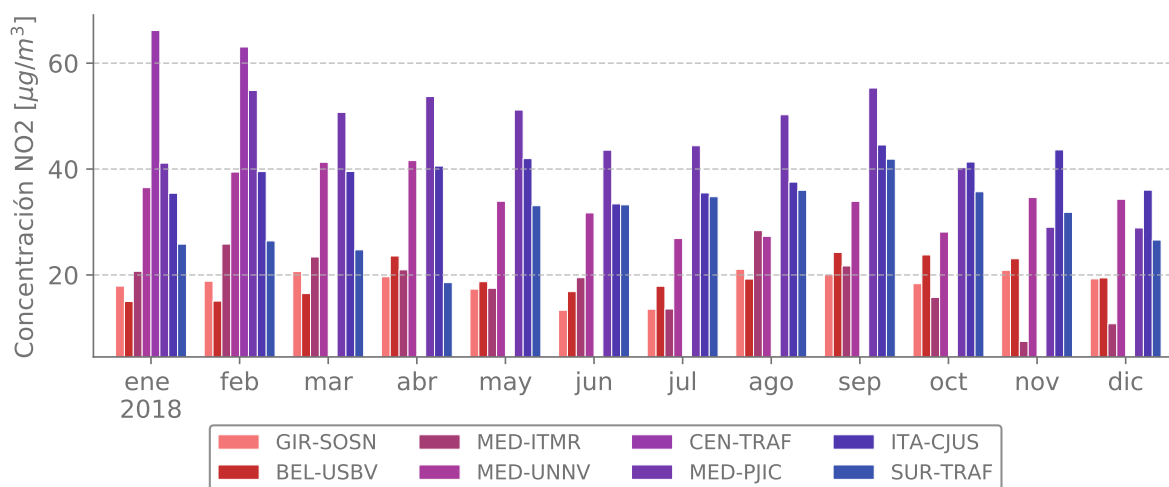
Para entender el comportamiento del ciclo diario de este contaminante se remite a la explicación del ciclo diario de los NO<sub>x</sub>. Cabe resaltar como en la Figura 7.4 es posible observar para algunas estaciones la disminución significativa de las concentraciones de NO durante las horas de la noche. Sin embargo en algunas otras este comportamiento no es posible observarlo, lo cual podría relacionarse a la interacción con otras dinámicas.



**Figura 7.4:** Ciclo diario de NO para las estaciones automáticas.  
Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

### Ciclo anual de la concentración de NO<sub>2</sub>

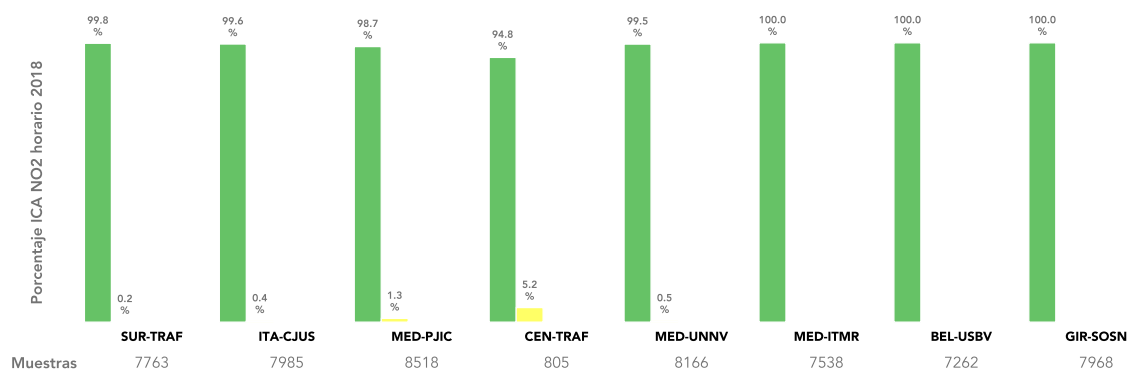
La Figura 7.5 presenta el ciclo anual del NO<sub>2</sub> durante el año 2018. Como se muestra, las estaciones más al norte del valle (GIR-SOSN, BEL-USBV) presentaron en términos generales las concentraciones más bajas en comparación con las estaciones ubicadas al sur del área metropolitana. La concentración mensual más alta en el año se registró para la estación CEN-TRAF durante el mes de enero, con un valor promedio de 66.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por su parte, la estación con la concentración mensual más baja corresponde a MED-ITMR con un valor igual a 7.45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de noviembre. Como se muestra, no existe una tendencia clara en las concentraciones de NO<sub>2</sub> a lo largo del año, para las diferentes estaciones de monitoreo.



**Figura 7.5:** Ciclo Anual de NO<sub>2</sub> para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá.

### Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias de NO<sub>2</sub>

La Figura 7.6 muestra el porcentaje del ICA asociado a NO<sub>2</sub> horario en las diferentes estaciones durante el año 2018. Puede observarse como la mayoría de estaciones presentaron valores de ICA equivalentes a la clasificación buena (verde). La estación con menor número de muestras durante el año fue la estación CEN-TRAF, dado que fue desinstalada en el mes de febrero. No se presentaron excedencias a la norma horaria en ninguna de las estaciones de monitoreo de NO<sub>2</sub>.



**Figura 7.6:** Porcentaje de las distintas clasificaciones del ICA para las concentraciones horarias de NO<sub>2</sub>

### Estadísticos de NO<sub>2</sub> para el 2018

La Tabla 7.1 presenta los valores medios, máximo horario (VM1H) y el Número de Excedencias a la Norma Horaria (NEN1H) para la concentración de NO<sub>2</sub> en cada una de las estaciones automáticas. La máxima concentración horaria durante el 2018 se presentó en la estación MED-PJIC, con un valor de 167.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , seguido por la estación ITA-CJUS con una concentración de 142.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Durante el 2018 no se presentaron excedencias a la norma horaria de NO<sub>2</sub> (definida como 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la resolución 2254 del 2017), y ninguna de las estaciones de monitoreo superó la norma anual de NO<sub>2</sub> (definida como 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la Resolución 2254 del 2017).

	GIR-SOSN	BEL-USBV	MED-ITMR	MED-UNNV	CEN-TRAF	MED-PJIC	ITA-CJUS	SUR-TRAF
MEDIA	18.4	19.7	18.7	34.4	NP	45.1	39.3	30.7
VM1H	100.0	89.6	81.6	149.3	NP	167.7	142.3	125.0
NEN1H	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabla 7.1:** Estadísticos de NO<sub>2</sub> para el año 2018 en las estaciones de la REDMCA.

## 8 Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de Carbono (CO) es un contaminante criterio monitoreado por la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. Sus principales fuentes emisoras provienen de la quema de combustible fósil como la gasolina o el petróleo, así como de la combustión de madera (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2015). La exposición a este contaminante puede reducir el transporte de oxígeno en el cuerpo, representando así un alto riesgo para la población.

La red de calidad del aire, durante el año 2018, contó con 3 estaciones de monitoreo automático de CO, ubicadas en 3 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, sin embargo, únicamente la estación MED-PJIC, estuvo operativa durante todo el año. La Figura 8.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones automáticas de CO.

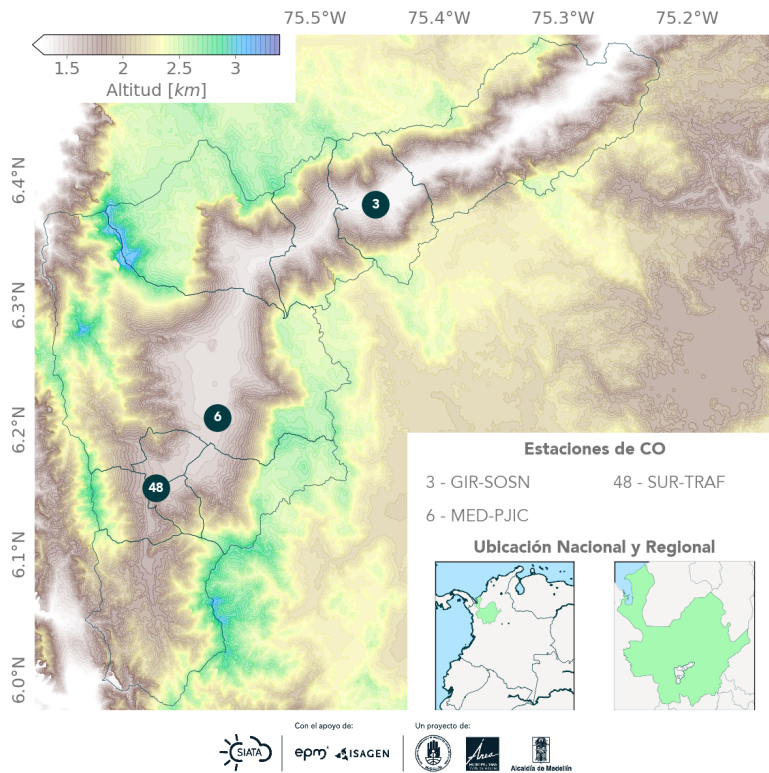


Figura 8.1: Estaciones automáticas de monitoreo de CO

Los analizadores de las estaciones GIR-SOSN y SUR-TRAF se retiraron de operación debido a inconsistencias identificadas en el funcionamiento de estos durante las verificaciones intermedias realizadas como parte del proceso de Gestión Operativa. Estos equipos fueron revisados y diagnosticados en el Laboratorio de Análisis y Pruebas de la Torre SIATA. Al equipo de CO de la estación SUR-TRAF se le realizaron diversas actividades enfocadas en el mantenimiento correctivo, incluyendo pruebas de estabilidad así como cambios en las componentes internas, no obstante, el equipo no respondió a estas

actividades, razón por la cual, y considerando además el tiempo de operación del equipo, se decidió suspender permanentemente su operación. El analizador de CO de la estación GIR-SOSN inició operación nuevamente en el año 2019.

### Ciclo diario de la concentración de CO

La Figura 8.2 presenta el ciclo diario de la concentración de CO. Puede observarse un comportamiento bimodal para las estaciones urbanas, condicionado principalmente por el ciclo diario del tráfico y la inestabilización de la atmósfera.

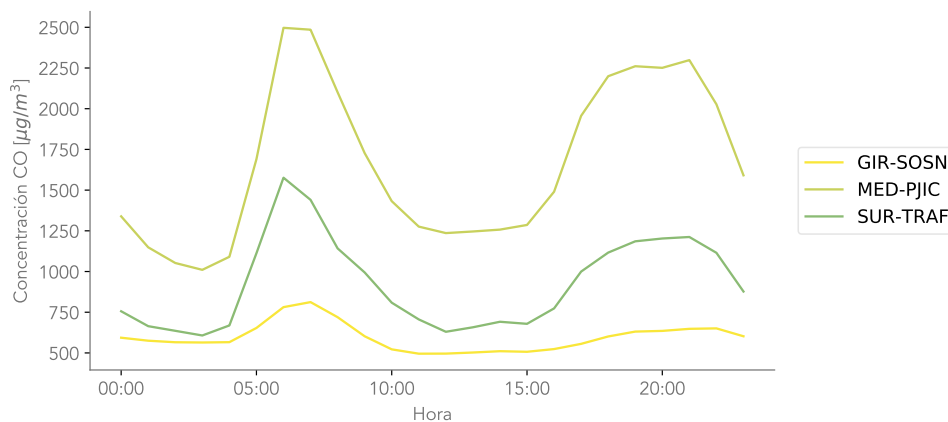
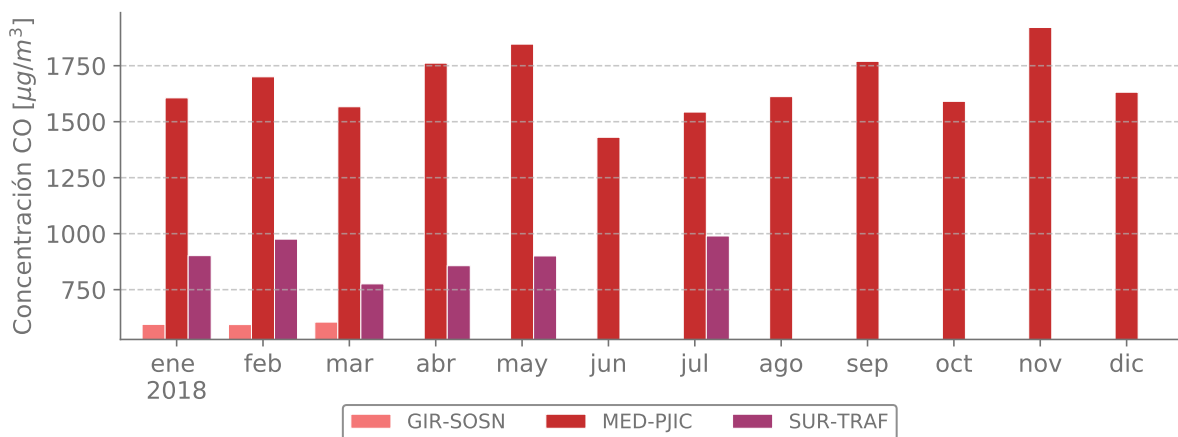


Figura 8.2: Ciclo Diario de CO para las estaciones automáticas

### Ciclo anual de la concentración de CO

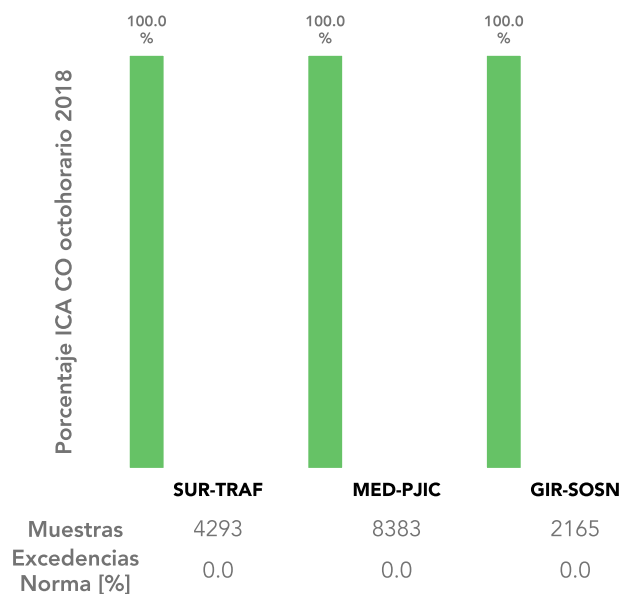
No se observa una tendencia clara para el ciclo anual de CO en el 2018; sin embargo; para MED-PJIC el mes con mayor concentración promedio fue noviembre con  $1920.5 \mu g/m^3$ , y el de menor concentración, fue junio con  $1430.4 \mu g/m^3$ . Ambos meses concuerdan con las condiciones de estabilidad e inestabilidad propicias para la acumulación y la dispersión de contaminantes.



**Figura 8.3:** Ciclo Anual de CO para el año 2018 en las estaciones de la REDMCA.

### Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones octohorarias de CO

La Figura 8.4 muestra el porcentaje del ICA para las concentraciones octohorarias en las diferentes estaciones durante el año. Puede observarse como, en todas las estaciones, el 100% del tiempo se presentaron valores de ICA equivalentes a la clasificación buena. La estación GIR-SOSN obtuvo la menor cantidad de muestras horarias en el año con un total de 2165.



**Figura 8.4:** Porcentaje de las distintas categorías del ICA para las concentraciones octohorarias de CO en las diferentes estaciones de la REDMCA.

## Estadísticos de CO para el 2018

En la Tabla 8.1 se presentan los valores máximos horarios (VM1H) y octohorarios (VM8H) de las concentraciones de Monóxido de Carbono obtenidas durante el 2018 para las distintas estaciones de monitoreo. Se presentan también el Número de Excedencias a la Norma Horaria (NEN1H) y Octohoraria (NEN8H). La mayoría de estos estadísticos, no pueden ser calculados para las estaciones GIR-SOSN y SUR-TRAF, por no contar con el mínimo del 75% de los datos, razón por la cual se reporta NP.

Según los resultados presentados, no se presentaron excedencias ni a la norma horaria ni a la norma octohoraria colombiana (Definidas como  $35000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en la Resolución 2254 del 2017).

	GIR-SOSN	MED-PJIC	SUR-TRAF
MEDIA	NP	1665.3	NP
VM1H	NP	5718.0	NP
NEN1H	0	0	0
VM8H	NP	4238.1	NP
NEN8H	0	0	0

**Tabla 8.1:** Estadísticos 2018 CO

## 9 Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)

El Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) es uno de los contaminantes criterios medidos por la Red de Calidad del Aire del Valle de Aburrá, y sus fuentes de emisión se atribuyen principalmente a los procesos de combustión del petróleo, el diesel, el carbón y el gas natural, los cuales tienen azufre entre sus componentes. El dióxido de azufre puede afectar las funciones respiratorias aún en bajas concentraciones y es uno de los principales precursores de la lluvia ácida.

La red de calidad del aire para el 2018 contó con 1 estación de monitoreo automático de SO<sub>2</sub>, ubicada en el municipio de Girardota. La Figura 9.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de la estación.

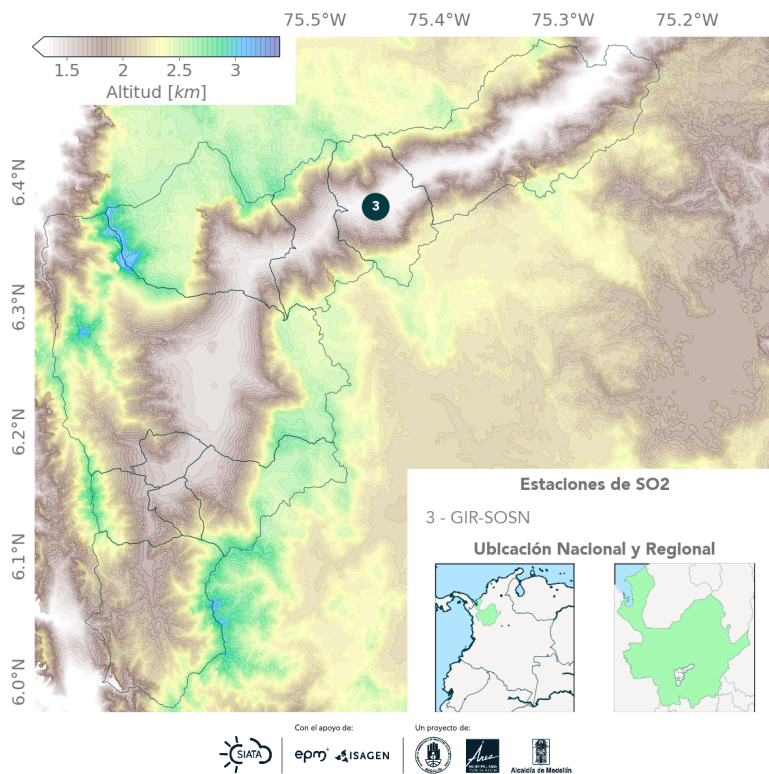


Figura 9.1: Estación automática de monitoreo de SO<sub>2</sub>

### Ciclo diario de la concentración de SO<sub>2</sub>

La Figura 9.2 presenta el ciclo diario de la concentración de SO<sub>2</sub> para la estación GIR-SOSN. Puede observarse como existe un comportamiento fundamentalmente unimodal para la concentración de SO<sub>2</sub> a lo largo del día, con un máximo cerca de las 9:00. Se podría identificar otro máximo al rededor de las 16:00, pero no es tan claro.

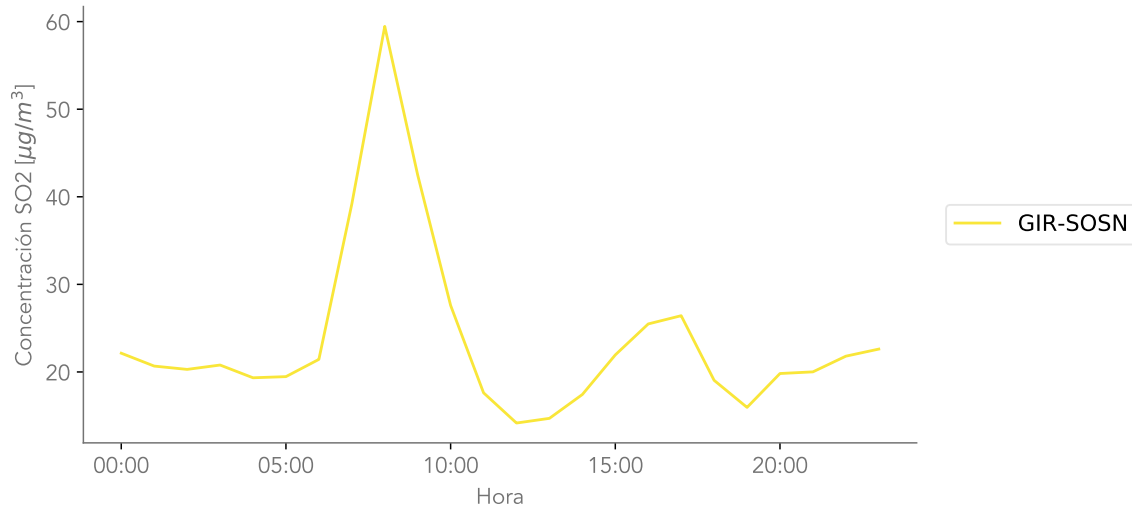


Figura 9.2: Ciclo diario de la concentración de SO<sub>2</sub> para la estación GIR-SOSN durante el año 2018.

### Ciclo anual de la concentración de SO<sub>2</sub>

En la Figura 9.3 se observan los promedios mensuales de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, para los meses en los cuales el registro de datos válidos superan el 75% de datos potenciales.

Los datos de SO<sub>2</sub> obtenidos durante los meses de Mayo a Julio se consideraron inválidos dado el comportamiento anómalo que presentaban respecto a la serie histórica. En el mes de agosto se suspendió la operación del analizador como resultado de inconsistencias identificadas en el desarrollo de las verificaciones intermedias realizadas en campo al equipo. Este fue sometido a labores de verificación y mantenimiento correctivo en las instalaciones del Laboratorio de Pruebas y Análisis, las cuales implicaron además el reemplazo de algunas componentes internas del equipo.

Considerando los periodos en los que se obtuvieron datos válidos, la concentración promedio mensual máxima, igual a 30.0 µg/m<sup>3</sup> se obtuvo en el mes de diciembre.

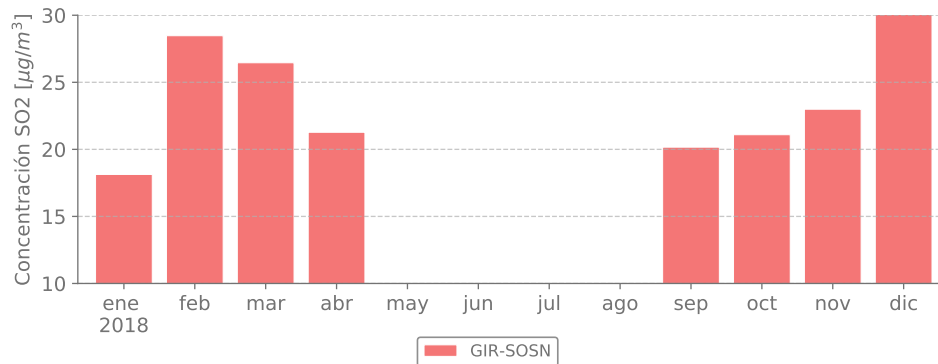
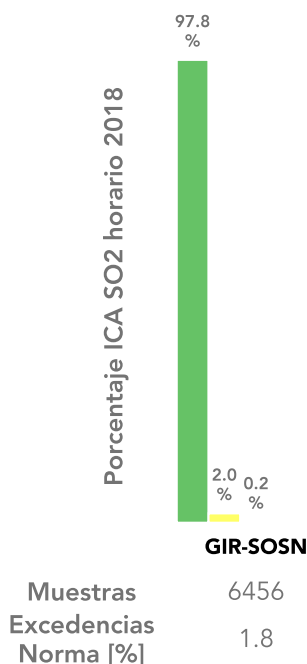


Figura 9.3: Ciclo Anual de CO para las estaciones automáticas

## Índice de Calidad del Aire (ICA) para concentraciones horarias de SO<sub>2</sub>

La Figura 9.4 muestra el ICA en porcentaje para las concentraciones horarias de SO<sub>2</sub> en la estación GIR-SOSN durante el 2019. Según esta Figura, la calidad del aire asociada a SO<sub>2</sub> horario fue buena la mayor parte del año. Las categorías Moderada y Dañina a la Salud de Grupos Sensibles, se alcanzaron solamente durante el 2.0 % y 0.2 % del tiempo, respectivamente.



**Figura 9.4:** Porcentaje de días en las distintas clasificaciones del ICA para la estación de SO<sub>2</sub>

## Estadísticos SO<sub>2</sub> para el 2018

La Tabla 9.1 presenta un resumen estadístico de los datos de SO<sub>2</sub> para el año 2018 en la estación GIR-SOSN. Según los resultados, para los periodos en los que se obtuvieron datos válidos de SO<sub>2</sub>, se presentaron 2 excedencias de la norma diaria y 83 excedencias de la norma horaria. Dado que el porcentaje de datos válido fue inferior al 75 %, no se reporta concentración promedio anual.

La estación perteneció a la REDMCA a lo largo del año 2018; sin embargo por los fallos presentados a mediados de año, sólo contó con 264 muestras diarias que cumplieran con el 75 % de los datos válidos.

	GIR-SOSN
CMD	264
NEND	2
NEN1H	83

**Tabla 9.1:** Estadísticos 2018 SO<sub>2</sub>

Nota: Cantidad de muestras diarias (CMD), número de excedencias a la norma diaria (NEND), número de excedencias a la norma horaria (NEN1H).

## 10 Material Particulado menor a $1 \mu m$ (PM1)

Así como el PM2.5 y el PM10, el PM1 (material particulado  $< 1 \mu g/m^3$ ) es un indicador del material particulado en el aire, que informan además de la concentración del contaminante, las características de tamaño, propiedad física involucrada en el tiempo de permanencia de la partícula en el aire, su transporte, y su efectos sobre la salud humana. En consecuencia de la distribución en masa para los diferentes diámetros, el material particulado es caracterizado como material particular fino y grueso, en donde el primero es monitoreado con el PM2.5 de manera generalizada, y en algunos casos con el PM1 Joint et al. (2006). La normativa colombiana toma como contaminantes criterio los indicadores PM2.5 y PM10.

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá cuenta con un equipo de monitoreo de material particulado menor a  $1 \mu m$ . Este equipo operó hasta principios del mes de abril de 2018 en la estación MED-PJIC y de allí se traslado a SUR-TRAF. En la figura 10.1 se muestra la ubicación de las estaciones antes mencionadas.

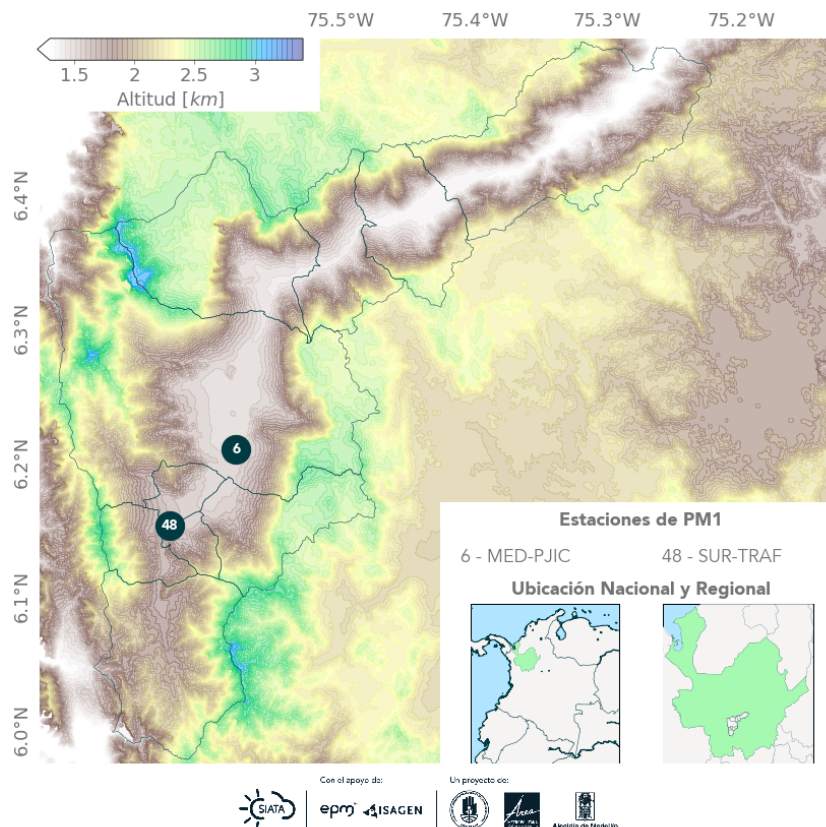
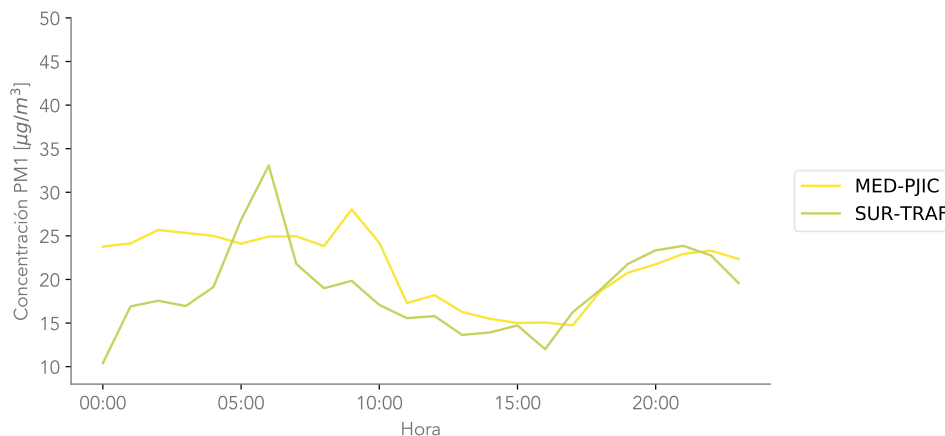


Figura 10.1: Estaciones automáticas de monitoreo PM1

## Ciclo diario de la concentración de PM1

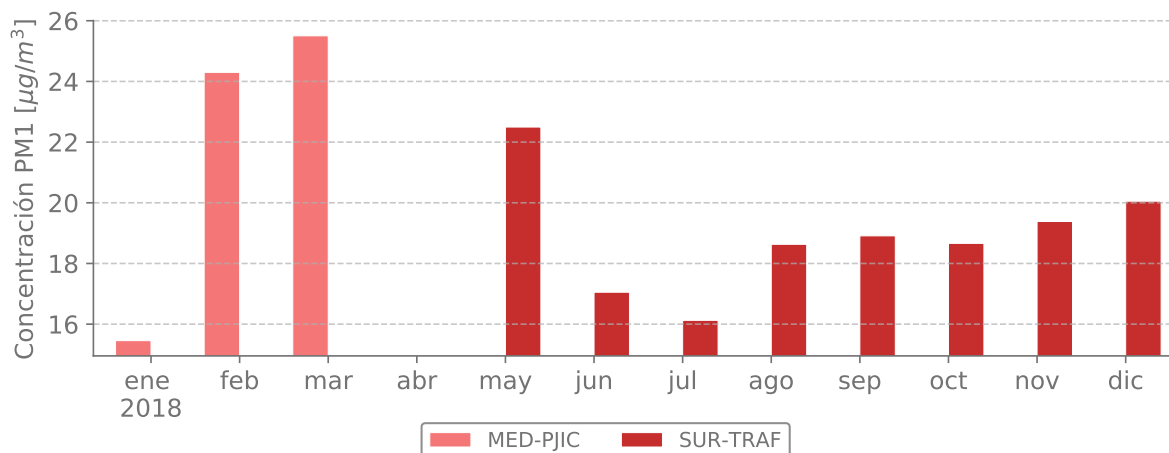
En la Figura 10.2 se observa el ciclo diario de las concentraciones de PM1 en MED-PJIC y SUR-TRAF a partir del promedio horario de los registros para el periodo de tiempo medido. Por tratarse de registros en periodos diferentes del año, sus concentraciones no son comparables; sin embargo se resalta la similitud de la variabilidad de las concentraciones en ambas estaciones, que tal como para el PM2.5 o como para el PM10, poseen un mínimo a medio día, en razones de la inestabilidad atmosférica.



**Figura 10.2:** Ciclo diario de PM1 para las estaciones automáticas ubicadas en el municipio de Medellín  
Nota: En la Tabla 2.7 se relacionan con más detalle los nombres de las estaciones.

## Ciclo anual de la concentración de PM1

La Figura 10.3 presenta el promedio mensual de las concentraciones de PM1, para los meses en que cada estación presentó por lo menos el 75% de los datos. A pesar de no ser posible hacer un seguimiento completo de las concentraciones de PM1 a lo largo del 2018 para una sola estación, las concentraciones resaltan el ciclo anual esperado para este contaminante, que similar al PM2.5 es acentuado en los meses de febrero y marzo, en correspondencia con la transición entre el periodo seco y de lluvia en la región andina colombiana. Así mismo, se resalta el mínimo de concentraciones en el mes de julio, mes en que la red meteorológica midió para la estación SUR-TRAF el mayor promedio mensual de temperatura del aire (ver Figura 12.3), indicando mayor energía boyante para las partículas.



**Figura 10.3:** Ciclo Anual del PM1 para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del valle de Aburrá.

### Estadísticos de PM1 para el 2018

Como es evidente en la Figura 10.3, los estadísticos resultantes de las concentraciones en las estaciones SUR-TRAF y MED-PJIC no pueden ser comparado directamente, en consecuencia no solo de la cantidad de datos, si no también del marcado ciclo anual del contaminante. La Tabla 10.1 contiene la cantidad de muestras diarias que cumplen con el 75 % de los datos horarios, y a partir de estas el dato promedio, máximo y mínimo para cada estaciones.

	MED-PJIC	SUR-TRAF
CMD	91	244
MAX	53.9	48.0
MEDIA	21.5	18.8
MIN	10.1	8.8

**Tabla 10.1:** Estadísticos 2018 PM1 para las estaciones manuales.

## 11 Ruido Ambiental

Durante el año 2018, la red de monitoreo de ruido ambiental contó con 7 estaciones distribuidas en 4 municipios del Área Metropolitana (Medellín, Girardota, Itagüí y Sabaneta); a lo largo del año no hubo modificaciones en la ubicación de los equipos, ni se realizaron instalaciones o desinstalaciones. En la Figura 11.1 se ilustra la ubicación de dichos puntos de monitoreo. Estas estaciones cuentan con sonómetros que miden la frecuencia sonora en tercios de octava. A partir de estos datos, siguiendo el procedimiento establecido en la Resolución 627 de 2006 del entonces ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se calcula la Presión Sonora Equivalente con ponderación frecuencial A y temporal lenta (S). Los datos se pueden agregar a escala horaria (LRAeq,h) o escala de días, diferenciando el tramo diurno (LRAeq,d) que considera los datos medidos entre las 7:01 y las 21:00, y el tramo nocturno (LRAeq,n) que consta de los datos medidos entre las 21:01 y las 7:00.

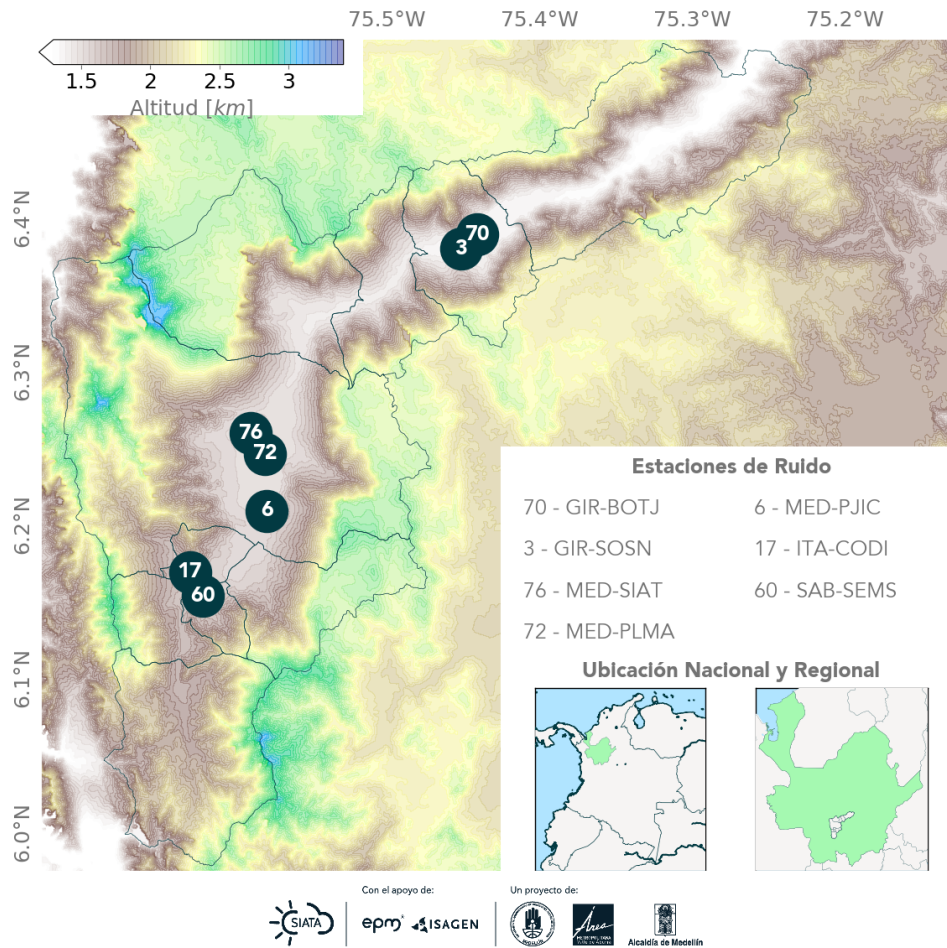


Figura 11.1: Puntos de monitoreo de la red de ruido ambiental.

La Tabla 11.1 contiene los porcentajes de datos válidos para cada variable de ruido ambiental por estación de la Red.

**Tabla 11.1:** Porcentaje de datos válidos de la REDMCA (ruido ambiental) para 2018

Estaciones	<i>LRAeqh</i>	<i>LRAeq, d</i>	<i>LRAeq, n</i>
GIR-BOTJ	84.9	96.7	96.2
GIR-SOSN	77.1	92.1	92.1
MED-SIAT	82.02	91.8	91.8
MED-PLMA	64.1	76.4	75.6
MED-PJIC	83.2	91.8	91.2
ITA-CODI	90.2	98.1	97.5
SAB-SEMS	84.0	95.6	95.1

Los equipos de ruido pertenecientes a la red presentan un mantenimiento semanal, en donde se lleva a cabo la limpieza general, revisión de conexiones eléctricas y la descarga de los datos, además de otras actividades que sean necesarias. En ocasiones los equipos presentan algún inconveniente técnico que no permite el registro satisfactorio de los datos, y será solo evidente en el momento de su descarga.

Durante el 2018, en la estación MED-PLMA se presentaron intermitencias recurrentes en el flujo de energía eléctrica que alimenta la estación, problema agravado por el limitado respaldo de la batería del equipo, el cual fue reemplazado en el mes de diciembre. Además, el sonómetro en MED-PLMA, así como en GIR-SOSN, fueron desinstalados temporalmente en el mes de noviembre para calibración con proveedor externo.

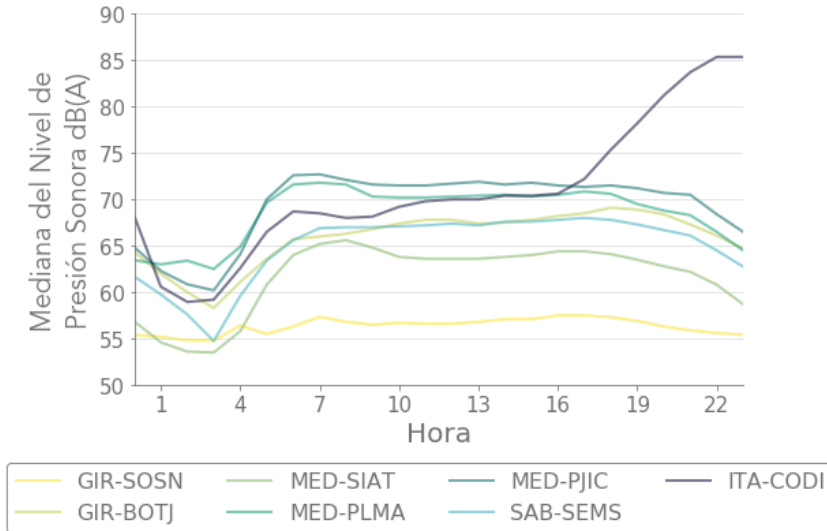
## Ciclo diurno de los niveles de presión sonora corregidos horarios

Dado que los niveles de presión sonora se reportan en la unidad “decibel” (dB), su escala de magnitudes no es lineal sino exponencial; debido a esto, al calcular el promedio de un conjunto de mediciones medidas en dB el resultado tiende a estar más influenciado por picos altos, dando lugar a que el ciclo diurno presente algunos valores atípicos. Debido a esto, resulta más robusto estadísticamente realizar el análisis a partir de la mediana de los datos en lugar del promedio.

La Figura 11.2 presenta el ciclo diurno de la mediana del nivel de presión sonora corregido horario para las diferentes estaciones que conformaron la red durante 2018. En general se observa que los valores mínimos de ruido se dan entre las 0 a.m. y las 4 a.m. en todas las estaciones; además los niveles de presión sonora corregidos horarios tienden a variar al rededor de entre 60 dB y 75 dB, siendo GIR-SOSN la que presenta menores magnitudes y variabilidad, mientras que ITA-CODI es la que reporta las mayores medianas, particularmente en horas de la noche (17:00 - 23:00).

En la mayoría de estaciones, donde la principal fuente de ruido corresponde al tránsito vehicular, las medianas más altas de presión sonora tienden a darse en la mañana (06:00 - 08:00) y permanecen relativamente estables hasta la 17:00, hora en que empiezan a reducirse; en el caso de ITA-CODI, al estar

muy influenciada por el ruido de establecimientos nocturnos cercanos al equipo de monitoreo, los mayores niveles de presión sonora se dan en la noche.

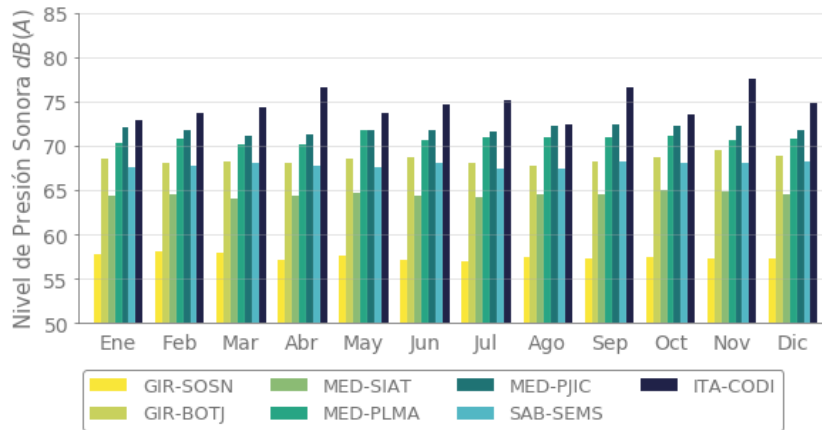


**Figura 11.2:** Ciclo diurno de la mediana del nivel de presión equivalente corregido diurno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá.

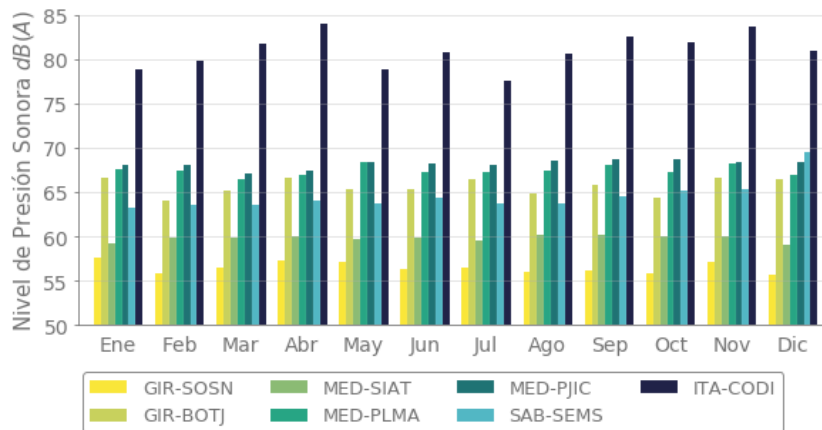
### Ciclo anual de los niveles de presión sonora corregidos diurno y nocturno

En las Figuras 11.3 y 11.4 se presentan las medianas mensuales de nivel de presión sonora corregido para los casos diurno y nocturno, respectivamente. En dichas gráficas se puede observar que el ruido ambiental no cuenta con una variabilidad a escala intranual que sea muy marcada y homogénea en todos los puntos de medición. La estación de ITA-CODI fue la que registró las mayores medianas tanto a nivel diurno como nocturno, seguida por las estaciones MED-PJIC y MED-PLMA. La estación SAB-SEMS presentó un incremento durante diciembre en el periodo nocturno, siendo la segunda estación con mayor ruido durante dicho mes.

Por otro lado, la estación de GIR-SOSN fue la que presentó menores valores todos los meses, tanto de día como de noche, a excepción de marzo.



**Figura 11.3:** Ciclo anual de la mediana del nivel de presión equivalente corregido diurno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá.



**Figura 11.4:** Ciclo anual de la mediana del nivel de presión equivalente corregido nocturno para todas las estaciones pertenecientes a la REDMCA del Valle de Aburrá.

## Estadísticos de Ruido Ambiental para el 2018

En las Tablas 11.2 y 11.3 se presenta un resumen estadístico de los niveles de presión sonora monitoreados en las diferentes estaciones de la REDMCA durante el año 2018 para los periodos diurno y nocturnos respectivamente.

Las estaciones de MED-PJIC, ITA-CODI y GIR-BOTJ reportaron una cantidad de excedencias a la norma diurna mucho mayor que las demás estaciones. En el caso de MED-PJIC esto está asociado a que el nivel permisible en esta zona es más restrictivo por ser una zona educativa; en el caso de ITA-CODI el alto número de excedencias está principalmente asociado a los establecimiento comerciales ubicados al rededor de la estación.

Para el periodo nocturno, se registraron excedencias en casi todas las muestras de todas las estaciones, a excepción de MED-PLMA donde la cantidad fue considerablemente menor.

La estación que presenta un mayor promedio, tanto a nivel diurno como nocturno es ITA-CODI, con magnitudes de 78.4 dB y 84.86 dB respectivamente. En cambio GIR-SOSN fue la que presentó los menores valores en ambos periodos: 61.91 dB para el diurno y 57.21 dB para el nocturno.

	GIR-SOSN	GIR-BOTJ	MED-SIAT	MED-PLMA	MED-PJIC	SAB-SEMS	ITA-CODI
CMD	336	353	335	279	335	349	358
NEND	6	105	3	2	335	51	295
Promedio LRAeq,d	61.91	73.16	67.13	71.51	71.9	71.04	78.41

**Tabla 11.2:** Estadísticos 2018 para ruido ambiental diurno (Cantidad de muestras diurnas, número de excedencias a la norma diurna y promedio de los niveles de presión sonora corregido diurno).

	GIR-SOSN	GIR-BOTJ	MED-SIAT	MED-PLMA	MED-PJIC	SAB-SEMS	ITA-CODI
CMN	336	351	335	275	333	347	356
NENN	336	351	335	38	333	346	356
Promedio LRAeq,n	57.21	72.47	60.14	68.87	68.48	69.03	84.86

**Tabla 11.3:** Estadísticos 2018 para ruido ambiental nocturno (Cantidad de muestras nocturnas, número de excedencias a la norma nocturna y promedio de los niveles de presión sonora corregido nocturno).

## 12 Meteorología

El monitoreo de variables meteorológicas es de especial importancia para el entendimiento de la calidad del aire en una región determinada, debido al papel fundamental que representa para el transporte y dispersión de contaminantes. La red de calidad del aire contó con 13 estaciones de monitoreo automático de variables meteorológicas en el 2018, ubicadas en 7 de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. La estación meteorológica ubicada en la estación CEN-TRAF salió de operación en el mes de marzo 2018.

Las estaciones BAR-PDLA, MED-PJIC, GIR-SOSN y MED-UDEM tuvieron instaladas estaciones meteorológicas marca Thies a lo largo del año; mientras que las estaciones en MED-LAYE, GIR-IECO y SUR-TRAF, fueron reemplazadas de equipos marca Met One por estaciones marca Thies; en consecuencia de fallos en los primeros.

Las estaciones meteorológicas *Thies* no permiten hacer seguimiento de los datos de radiación solar global, sin embargo, SIATA cuenta actualmente con una red de piranómetros instalados en varios puntos del Valle de Aburrá, la cual permite tener información más detallada acerca de los niveles de radiación en el valle.

La Figura 12.1 presenta el mapa con la ubicación geográfica de las diferentes estaciones automáticas:

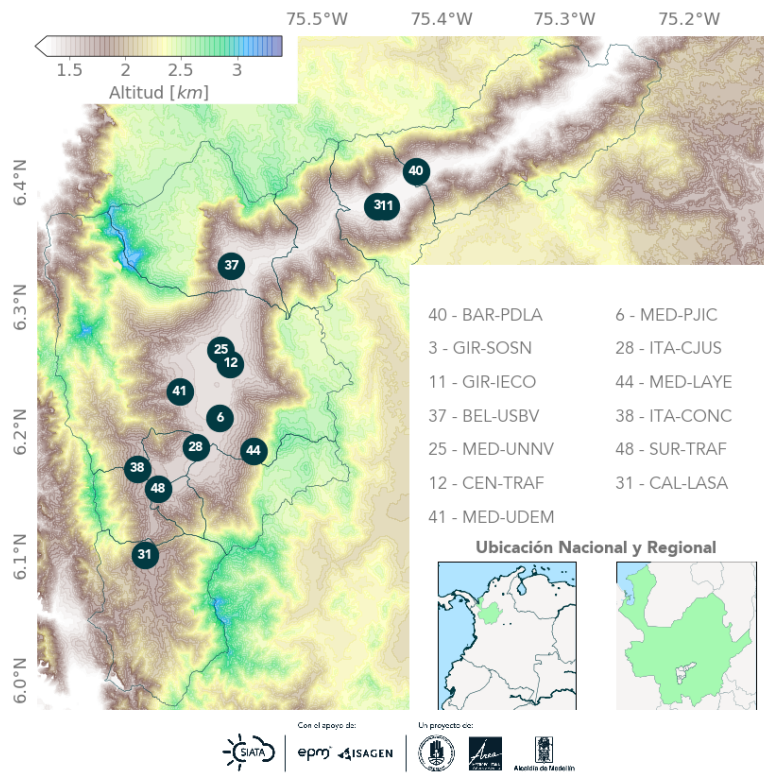


Figura 12.1: Estaciones automáticas de monitoreo de meteorología

La Tabla 12.1 muestra el porcentaje de datos válidos para las variables meteorológicas en cada una de las estaciones de monitoreo; donde, P es presión atmosférica, PPT es precipitación, T es temperatura del Aire, RG es radiación solar global, HR representa humedad Relativa, VV es la velocidad del viento, y DV es la dirección del viento.

**Tabla 12.1:** Porcentaje de datos válidos Meteorología

Estaciones	P	PPT	T	RG	HR	VV	DV
BAR-PDLA	98.8	99.9	98.8		98.8	98.8	99.2
BEL-USBV	96.6		96.7	96.7	96.6	95.2	96.7
CAL-LASA	95.6		95.9	92.2	95.9	95.9	95.9
CEN-TRAF		99.1	99.1	96.0	98.7	96.5	99.1
GIR-IECO	89.2	98.2	92.6		92.6	83.3	94.9
GIR-SOSN	82.2	99.9	81.9		81.9	82.2	86.4
ITA-CJUS	96.9		97.1	97.1	97.1	97.1	97.0
ITA-CONC	97.9	97.9	94.7	96.2	91.3	93.4	97.8
MED-LAYE	96.7	99.8	96.7	98.5	96.7	97.5	97.8
MED-PJIC	96.1	99.7	91.3		91.2	93.4	97.5
MED-UDEM	85.4	99.8	85.4		85.4	85.4	89.6
MED-UNNV	82.7	81.8	82.7	81.2	82.7	80.6	82.7
SUR-TRAF	94.1	87.2	93.9	97.5	96.7	71.9	71.9

A partir del mes de abril del 2018, el equipo de medición de la magnitud y la dirección de la velocidad del viento en SUR-TRAF (para ese tiempo marca Met One), comenzó a registrar datos inconsistentes con la trama histórica de la estación e incluso del valle; en consecuencia, los datos fueron invalidados. En consideración a esto, la estación meteorológica fue reemplazada por una estación marca thies, instalada a finales del mes e junio.

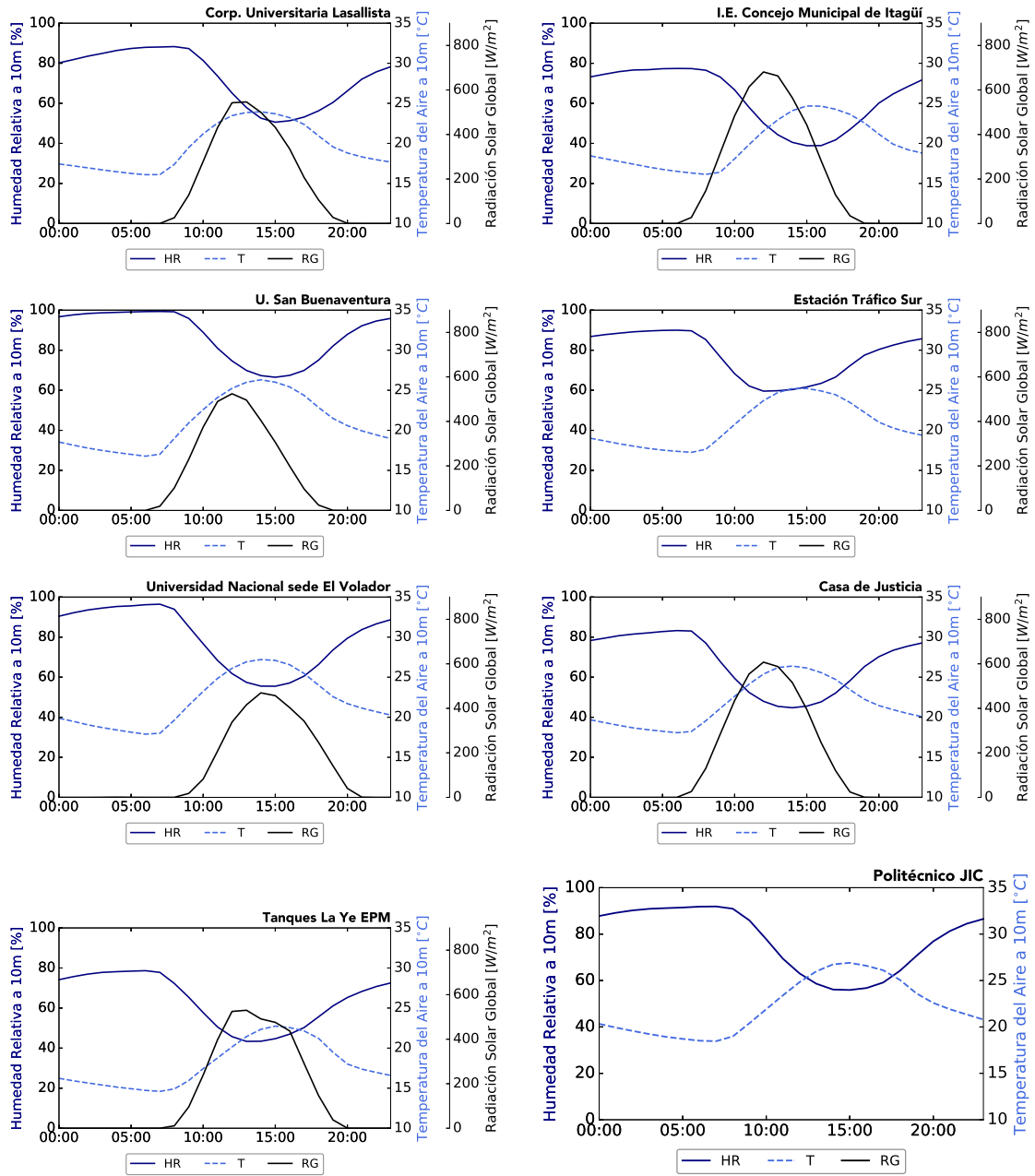
Con ausencia de casi tres meses de datos (abril, mayo y junio), la estación SUR-TRAF registró tan solo el 71.9% de los datos potenciales para el año 2018, en las variables asociadas a la velocidad del viento.

## Radiación Solar, Temperatura y Humedad Relativa

La Figura 12.2 presenta el ciclo diurno de las variables meteorológicas Radiación solar, Temperatura y Humedad Relativa. Como es de esperarse puede verse la fuerte relación que existe entre las diferentes variables, la temperatura depende esencialmente de la radiación solar, es por esto que se observa claramente como el pico de ambas variables se encuentra cerca del medio día.

La variación de la Humedad Relativa se puede asociar a su vez a la temperatura del aire, dado que a mayor temperatura, mayor evaporación. Se observa por tanto para las diferentes estaciones que a medida que la temperatura se incrementa, la humedad disminuye, presentando su mínimo cerca del medio día. Las diferencias en el máximo de la radiación solar entre los distintos puntos de monitoreo se deben

principalmente a factores como la nubosidad.



**Figura 12.2:** Ciclo diario de radiación solar, temperatura y humedad relativa para el año 2018 en las distintas estaciones meteorológicas de la REDMCA.

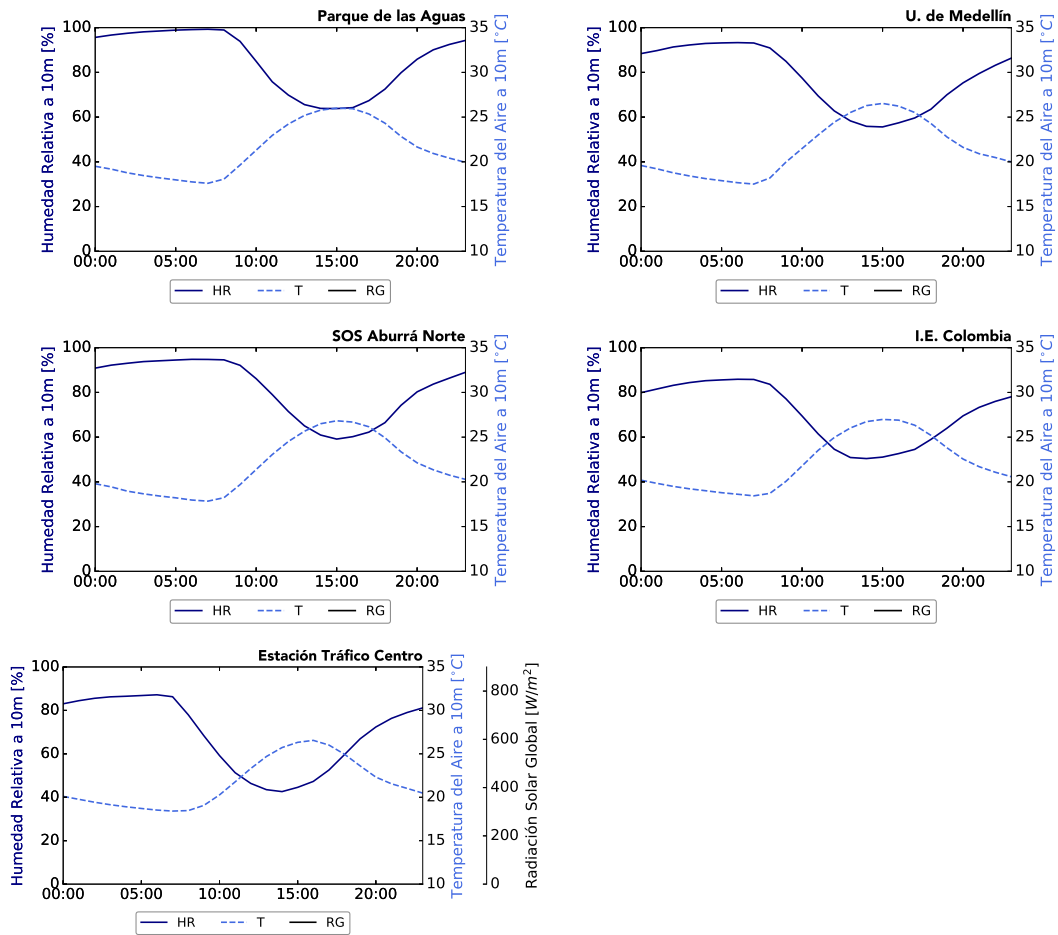


Figura 12.2: Continuación

Así como en el ciclo diurno, las variables radiación incidente y temperatura poseen una relación directa entre ellas, e inversa a la humedad relativa. La radiación. Para la mayoría de las estaciones los maximos de radiación se presentan en los meses de Febrero y agosto; mientras los máximos de humedad relativa, se presentan en los meses de mayo y noviembre.

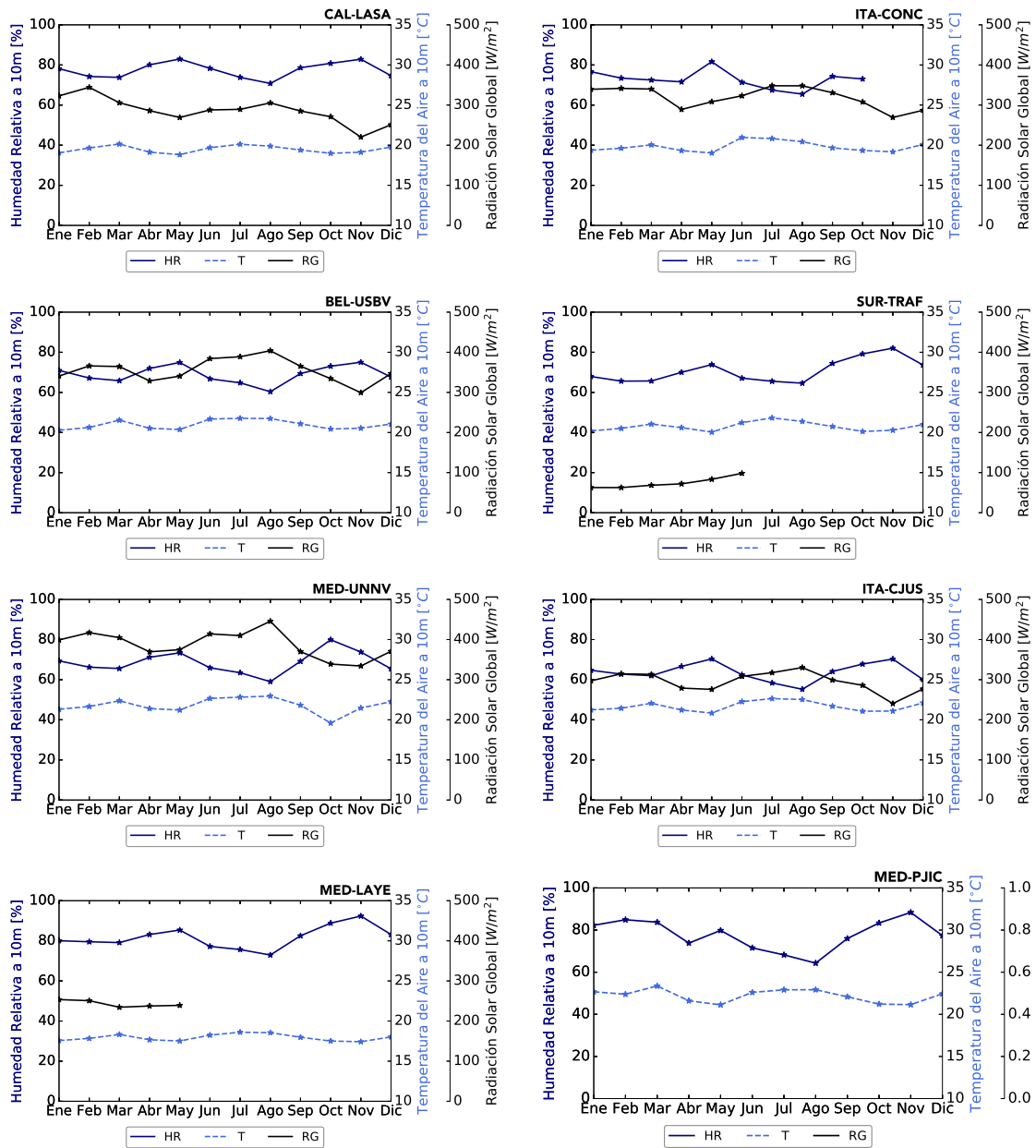


Figura 12.3: Ciclo anual de radiación solar, temperatura y humedad relativa para el año 2018 en las distintas estaciones meteorológicas de la REDMCA.

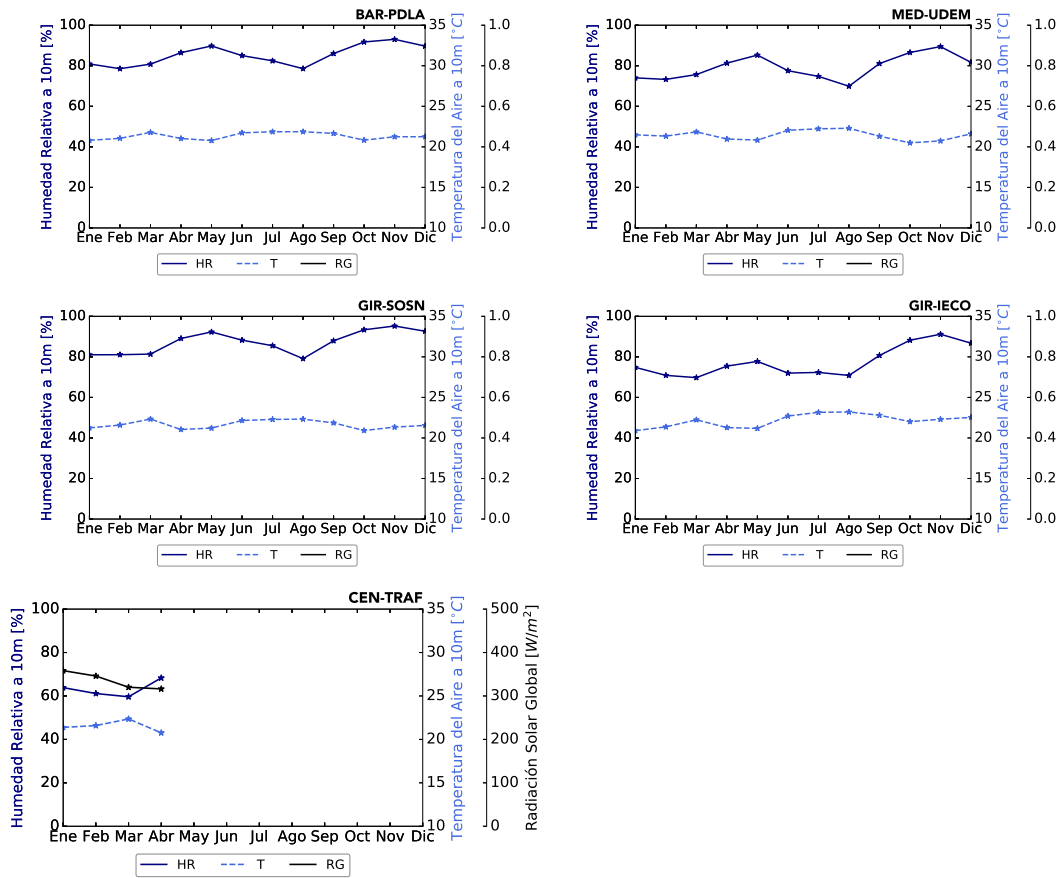
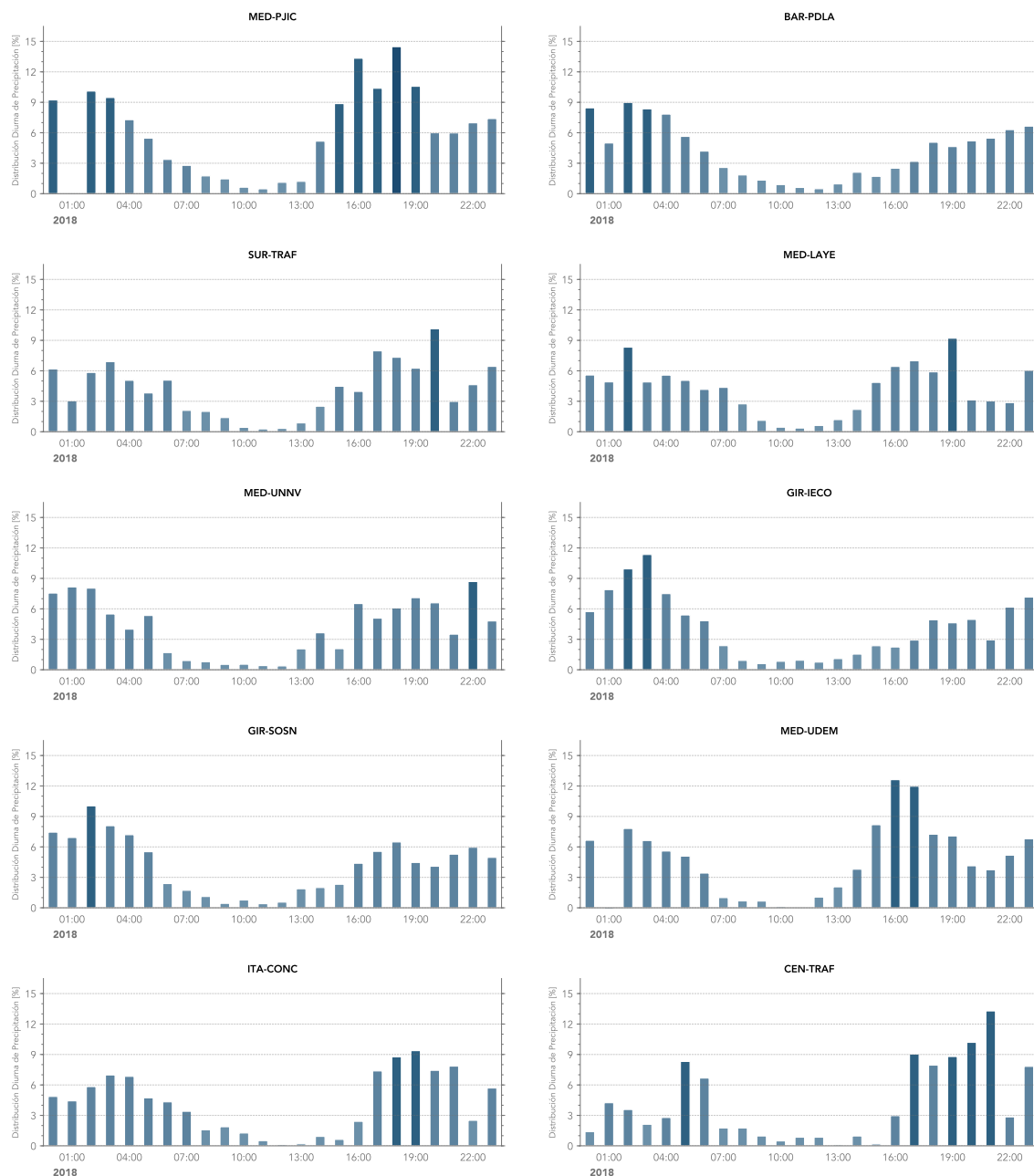


Figura 12.3: Continuación

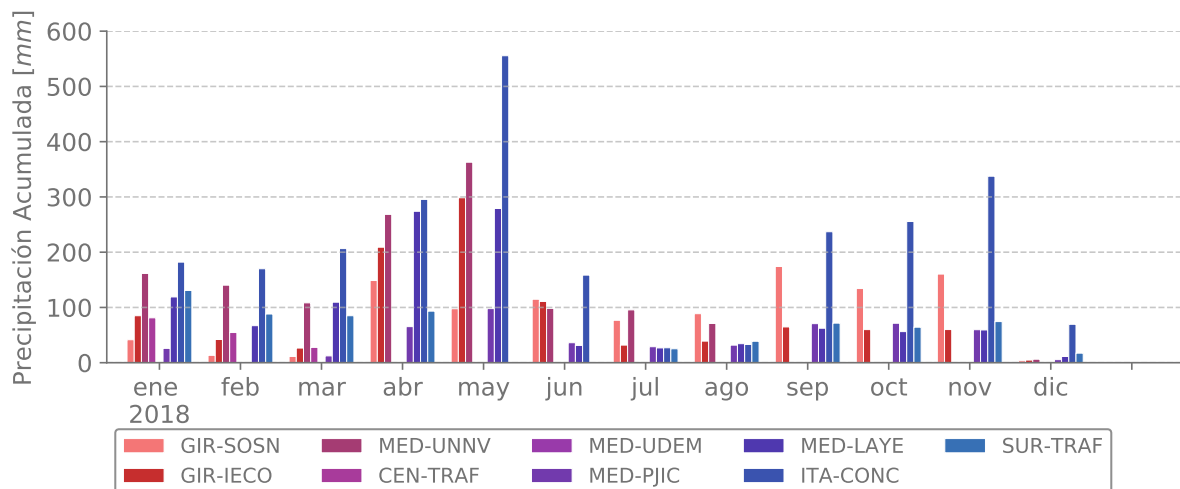
## Precipitación

La Figura 12.4 presenta el ciclo diario de la frecuencia de la precipitación horaria para cada una de las estaciones meteorológicas que estuvieron operativas durante el 2018. En esta Figura es clara la tendencia compartida de las precipitaciones en el Valle de Aburrá, con mínimo de lluvias cerca de las 10:00 y las 13:00. En las estaciones más al sur del valle, el máximo más acentuado de precipitación se da en horas de la noche, mientras que en las estaciones más al norte ocurre en la mañana. En términos generales la mañana y la noche son los periodos con mayor acumulado de precipitación para el valle.



**Figura 12.4:** Precipitación horaria y acumulada para las distintas estaciones

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, y tal como se puede observar en la Figura 12.5, el Valle de Aburrá presenta dos periodos de mayor precipitación en el año, el primero durante los meses de abril-mayo y el segundo durante los meses de octubre-noviembre. Ambos periodos, y en especial la época de transición (entre temporada seca y lluviosa), se caracterizan por densas coberturas de nubes.



**Figura 12.5:** Ciclo anual del acumulado de precipitación 2018

En la Tabla 12.2 se presentan los estadísticos de la precipitación en cada punto de monitoreo meteorológico al interior del Valle de Aburrá. Las estaciones con máximo acumulado mensual, anual y diario fueron ITA-CONC y MED-UNNV; sin embargo en BAR-PDLA se registró la mayor cantidad de días sin precipitación.

La estación meteorologica en CEN-TRAF opero únicamente hasta el mes de marzo.

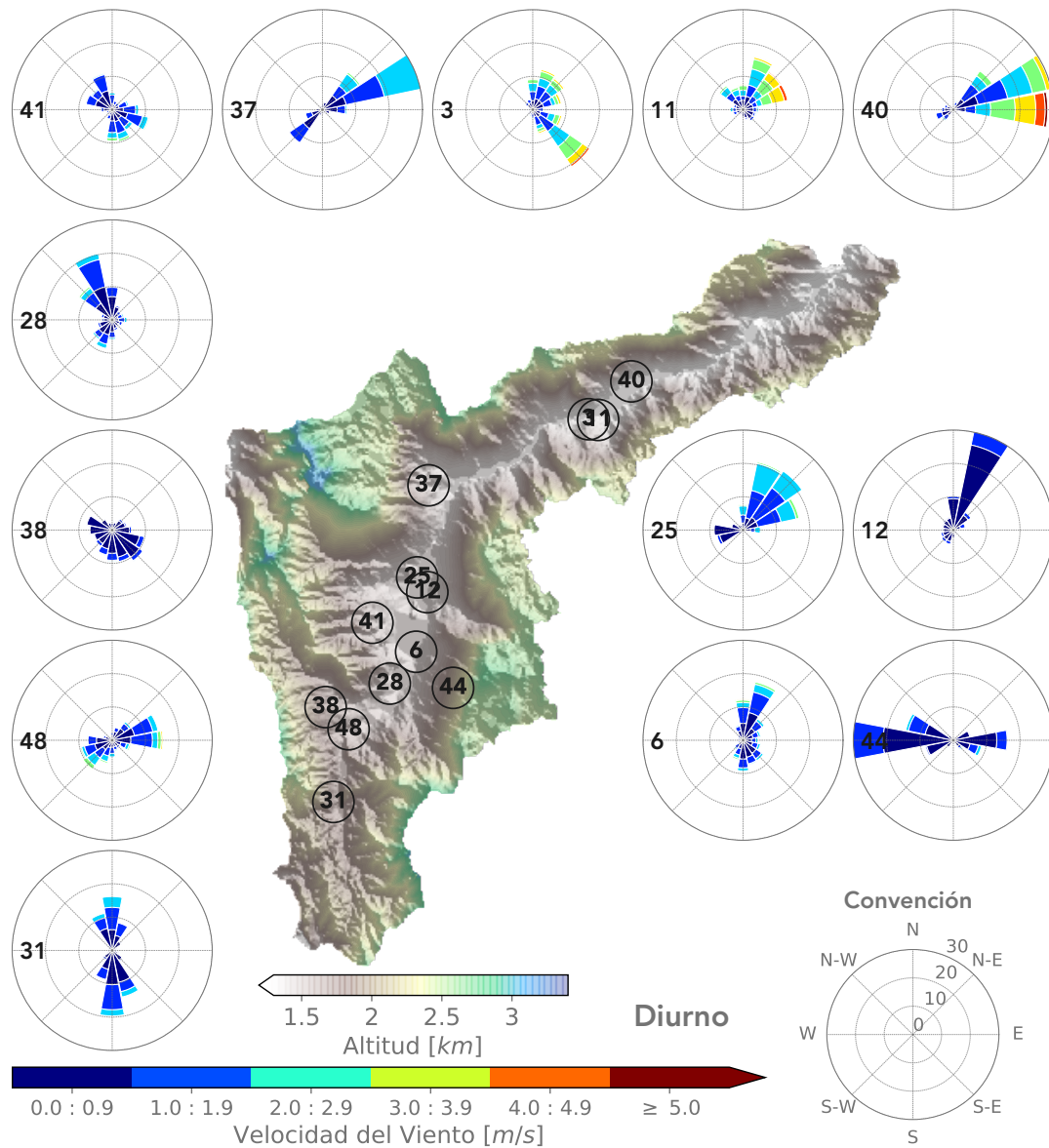
**Tabla 12.2:** Estadísticos Precipitación

Estación	Acumulado Anual (mm)	Días Sin Precipitación	Máximo Acumulado Diario (mm)	Máximo Acumulado Mensual (mm)
BAR-PDLA	534.1	46.0	17.7	119.1
GIR-SOSN	1064.9	121.0	41.2	174.1
GIR-IECO	1032.1	108.0	41.0	298.5
MED-UNNV	1566.1	179.0	67.6	362.8
CEN-TRAF	164.8	314.0	38.3	81.2
MED-UDEM	1146.9	115.0	53.0	181.7
MED-PJIC	497.2	61.0	29.0	97.9
MED-LAYE	1130.1	99.0	42.5	279.0
ITA-CONC	2527.5	139.0	92.0	555.5
SUR-TRAF	807.1	114.0	34.1	130.7

**Vientos**

Las Figuras 12.6, 12.7 y 12.8 presentan las rosas de vientos diurnas, nocturnas y totales, respectivamente, para las diferentes estaciones meteorológicas. Estas brindan información acerca de la distribución de las magnitudes de la velocidad de los vientos y de la frecuencia con la que estos se presentan con determinada dirección en los diferentes periodos del día.

La velocidad del viento horizontal en superficie ayuda a desplazar y dispersar los contaminantes al interior del Valle, sin ser este su principal condicional meteorológico.



**Figura 12.6:** Rosas de viento diurnas para las distintas estaciones

Como puede observarse a partir de las rosas de viento presentadas, la orientación de donde provienen los vientos varía de estación a estación dentro del área metropolitana tanto en horario diurno como nocturno, así mismo sucede con la velocidad de los vientos.

La velocidad del viento puede ser resultado de forzamientos térmicos o mecánicos que logren influenciar el sensor de medición, que pueden ser de una escala de tan solo algunos metros o kilómetros. En una cuenca hidrológica, un patrón en la velocidad del viento esperado son direcciones aguas arriba durante el día y aguas abajo durante la noche, sin embargo, el nivel de urbanización de la cuenca, así como la presencia de otras geoformas modifican los resultados esperados.

Las estaciones MED-LAYE y BEL-USBV, estaciones 44 y 37 respectivamente, por ejemplo presentan diferencias casi de 180 en la dirección de la velocidad del viento durante el día y durante la noche, que de acuerdo al DEM (Modelo de elevación digital), concuerda con el patrón de viento mencionado anteriormente para cuencas hidrológicas.

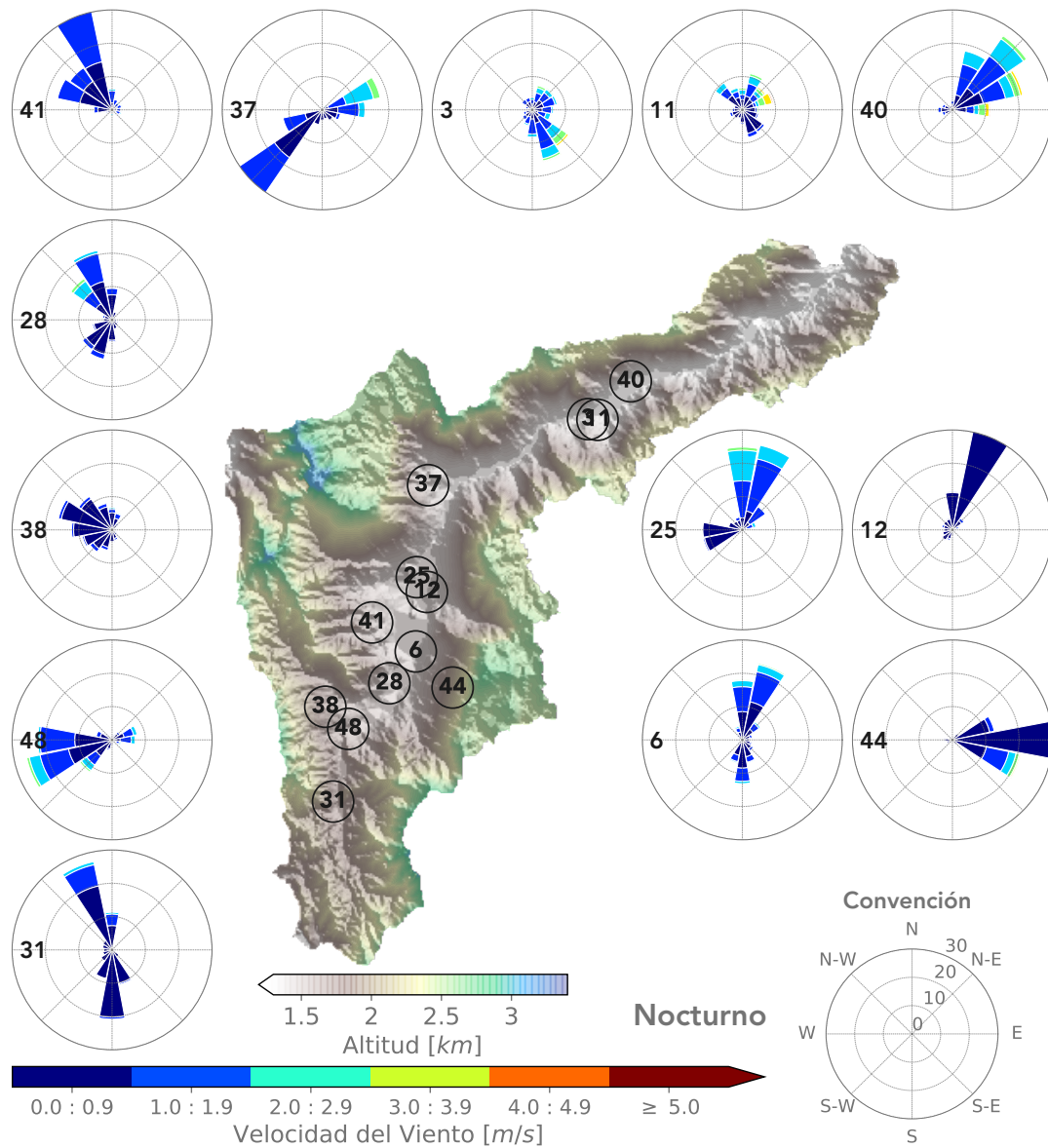


Figura 12.7: Rosas de viento nocturnas para las distintas estaciones

La estación con las velocidades diurnas más altas durante el año corresponde a la estación BAR-PDLA, con una velocidad promedio de  $2.03 \text{ m/s}$ , y la estación con velocidades diurnas más bajas corresponde a la estación ITA-CONC, con una velocidad promedio de  $0.50 \text{ m/s}$ . En el caso nocturno, la mayor velocidad promedio la presentó la estación MED-UNNV, con un promedio de  $1.18 \text{ m/s}$ , mientras que la velocidad más baja se presentó en CAL-LASA con un promedio de  $0.46 \text{ m/s}$ .

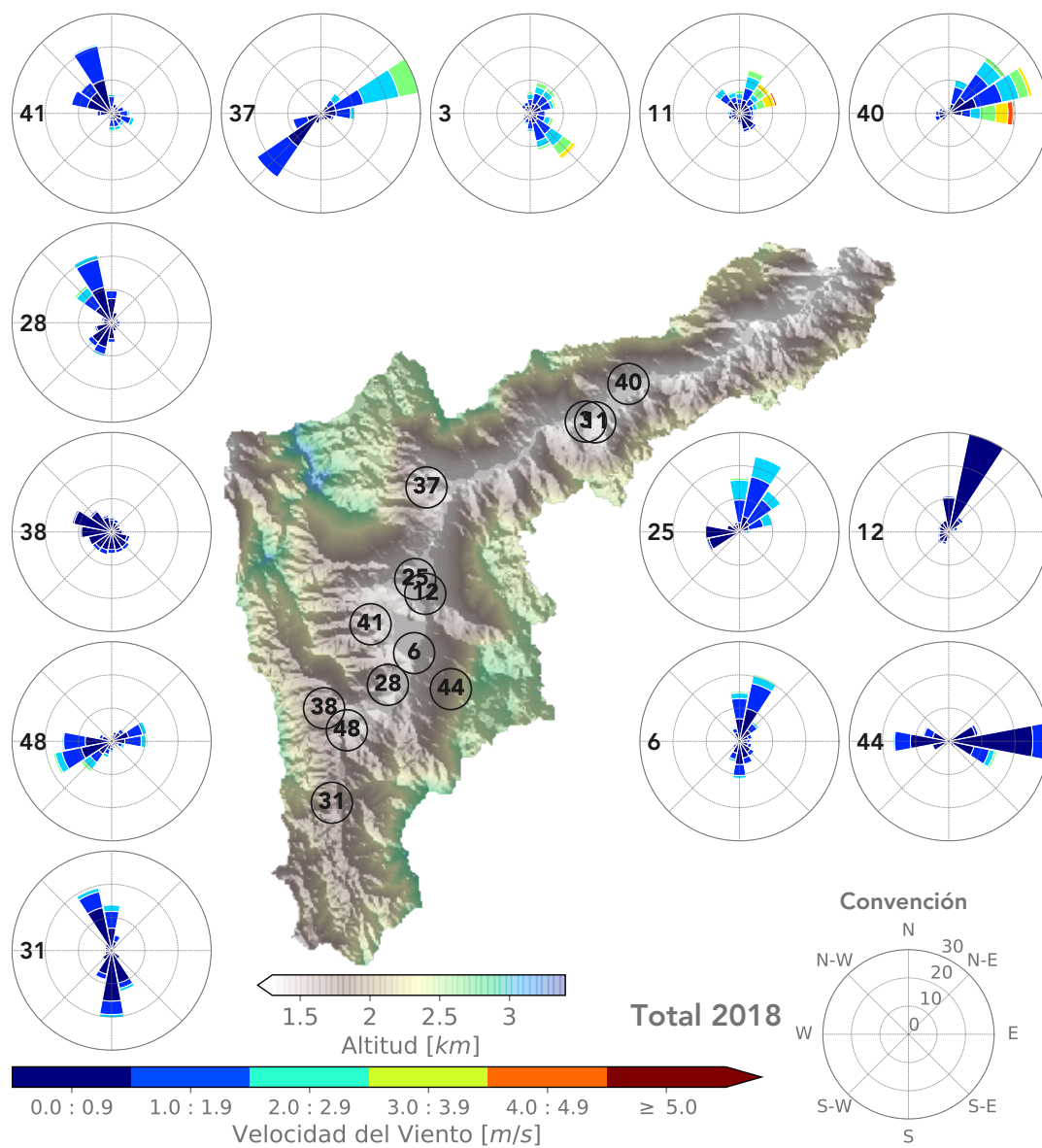


Figura 12.8: Rosas de viento totales para las distintas estaciones

## 13 Sensores remotos para la evaluación de las condiciones meteorológicas y su influencia en la calidad del aire

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 la advección horizontal 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.

En el Valle de Aburrá el análisis de la variabilidad de la calidad del aire está fundamentada en el análisis de las variables meteorológicas que se han demostrado, tienen una influencia directa en las concentraciones de contaminantes en la atmósfera local. En este sentido las herramientas que se expondrán a continuación son utilizadas permanentemente en la evaluación del estado de la calidad del aire actual y el pronóstico a corto plazo.

### Ceilómetros

Los ceilómetros son fundamentalmente utilizados para conocer la evolución y estructura de la Capa Límite Atmosférica, la altura, transición de régimen estable a inestables, y la distribución de contaminantes en la vertical. el análisis en conjunto de esta información permite entre otros, determinar la posibilidad que tendrá la atmósfera en dispersar los contaminantes emitidos en la superficie en el corto plazo, y si la contaminación es debida a fenómenos locales o externos.

Los ceilómetros son sistemas Lidar simplificados y robustos que operan en una única longitud de onda en el infrarrojo cercano (Entre los 900 y 1100 nm) y proporcionan información acerca de la energía del pulso-láser que es retrodispersada por las nubes y los diferentes elementos de la atmósfera (partículas en mayor proporción que moléculas) en forma de un coeficiente atenuado de *Retrodispersión ó Backscatter* ( $\beta$ ). Por otro lado, los ceilómetros no proporcionan ninguna información de absorción, sin embargo, debido a que el tamaño de muchas partículas varía con su contenido de humedad, la retrodispersión también está influenciada por la humedad atmosférica; adicionalmente la presencia de nubes y precipitación inhibe las mediciones del ceilómetro. La tasa de repetición de los pulsos está en el orden de algunos kilohertz, la energía del pulso es lo suficientemente baja para permitir su operación sin riesgos a los seres humanos, sin embargo, también resulta en señales significativamente ruidosas que en ocasiones dificultan su análisis. Propiedades microfísicas de los aerosoles como la extinción  $\alpha_p$  o la profundidad óptica de una capa de aerosol  $\tau_p$  requiere información de múltiples longitudes de onda en los canales de detección.



Figura 13.1: Ceilómetro Vaisala CL-51

Los *ceilómetros* fueron inicialmente diseñados para la detección de la base de las nubes y la visibilidad vertical, sin embargo, gracias a recientes avances en hardware, su bajo costo y capacidad de trabajar de manera continua y sin supervisión por largos periodos de tiempo, se han convertido en una herramienta ampliamente difundida para el estudio de la CLA y la calidad del aire. Una buena estimación que les depende en gran medida del mezclado en la vertical de estos, cuando es débil, múltiples capas de aerosol pueden formarse en la atmósfera y producir ambigüedad en las estimaciones.

### Ecuación Lidar

Los esquemas de inversión de las propiedades ópticas de los aerosoles a partir de Lidar y ceilómetros están directamente relacionadas con la retrodispersión y extinción de la radiación. La ecuación Lidar, válida igualmente para los ceilómetros, se presenta a continuación expresada como la potencia óptica

recibida  $P(z, \lambda)$  por el instrumento a una determinada distancia  $z$  y una longitud de onda  $\lambda$

$$P(z, \lambda) = \frac{c}{2z^2} \underbrace{P_0 A \eta O(z) \Delta t}_{\text{Instrumento}} \times \underbrace{\beta(z, \lambda) \tau^2(z, \lambda)}_{\text{Backscatter Atenuado}} \quad (13.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz,  $\Delta t$  es la duración del pulso,  $P_0$  la potencia promedio del láser durante cada pulso,  $A$  es el área del receptor y  $\eta$  la eficiencia, y  $O(z)$  la función de solapamiento entre el haz transmitido y el campo de visión del receptor. Estos últimos pertenecen a los términos dependientes del diseño del instrumento. Por su parte, los términos atmosféricos están representados en  $\beta(z, \lambda)$  coeficiente backscatter y  $\tau(z, \lambda)$  la Transmitancia de la atmósfera entre el ceilómetro y el volumen de dispersión, la cual está expresada por

$$\tau^2 = e^{\left\{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right\}} \quad (13.2)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de extinción. La transmitancia equivale a 1 en un cielo despejado, lo cual significa no atenuación. La anterior ecuación considera que solo ocurre Backscatter elástico y se asume que solo retrodispersión en  $z$  ocurre.

Finalmente se define el Backscatter atenuado  $\beta^*(z)$  como

$$\frac{P(z)z^2}{C_L} = \beta^*(z) = \beta(z) e^{\left\{-2 \int_0^z \alpha(z') dz'\right\}} \quad (13.3)$$

La red de ceilómetros del SIATA opera desde Octubre de 2014 (Registro más extenso) y consta de 3 sensores Vaisala CL-51 (Ver Figura 13.1); sensores activos clasificados como dispositivos láser Clase 1M de acuerdo con el estándar internacional IEC/EN 60 825-1. Bajo condiciones normales de operación, el Vaisala CL-51 opera en una longitud de onda de 910 nm y muestrea digitalmente la señal recibida de 0 a 100  $\mu s$ . Envía una señal láser cada 67 ns, proporcionando una resolución espacial de 10 m desde la superficie hasta los 15.000 m con una resolución temporal de 16 s.

El Vaisala CL-51 tiene un diseño óptico de un solo lente, el cual usa la parte interna para transmitir y la parte externa para recibir la luz, esto proporciona superposición de la luz transmitida y el campo de visión del receptor en todo el rango de medición y permite la detección confiable de capas muy bajas, por debajo de 200 m (?).

## Radar Perfilador de Vientos (RWP)

Los perfiles de viento tomados desde la base del Valle posibilitan el análisis de las condiciones dinámicas regionales, entre ellas la más importante para el análisis de las condiciones locales, es el forzamiento sinóptico generado por lo vientos Alisios. En condiciones normales, los vientos alisios tienen la capacidad de dispersar horizontalmente los contaminantes que ascienden hasta el tope de las montañas del Valle, cuando este forzamiento es débil o cambia su estructura puede tener repercusiones importantes en la calidad del aire del Valle.

Los perfiladores de viento (RWP) son radares doppler usados para la detección de perfiles de las componentes del viento en la vertical, y representan otra técnica de sensado remoto comúnmente utilizada para el monitoreo de la CLA gracias a las propiedades turbulentas y la influencia de los vientos en la estructura de la misma. Otras variables como la velocidad vertical ( $\omega$ ) son derivadas a partir de las mediciones del perfilador, proporcionando herramientas importantes para estudiar los procesos relacionados con las condiciones de estabilidad atmosférica y actividad de mezcla cerca de la superficie. Los RWP operan a frecuencias entre los 50 MHz y 1.5 GHz, aquellos que operan a frecuencias de hasta 300 MHz son llamados Perfiladores VHF (Very High Frequency), por su parte los Perfiladores UHF (Ultra High Frequency) operan a frecuencias mayores de 300 MHz. Para este tipo de instrumentos típicamente una señal electromagnética es emitida en varias direcciones o inclinaciones a partir de un punto fijo incluyendo en general una vertical y varias inclinados en direcciones ortogonales. La señal transmitida es en parte dispersada por variaciones en la refractividad, causadas por cambios en la humedad, temperatura y presión a pequeña escala. Estas variaciones en la refractividad son advectadas por el viento dando información acerca de su velocidad y dirección.



**Figura 13.2:** Radar Perfilador de Vientos RAPTOR VAD-BL.

El RAPTOR VAD-BL (Velocity–Azimuth Display Boundary Layer) diseñado y construido por DeTect Inc. (Ver Figura 13.2), opera desde Diciembre de 2014 de manera continua en la zona central del valle de Aburrá aledaño a las instalaciones del aeropuerto local, el Olaya Herrera. El RAPTOR de SIATA opera en los 1290 MHz y tiene una resolución temporal de 5 minutos y dos resoluciones diferentes en la vertical alcanzando hasta los 8 km en condiciones ideales; alta resolución 60 m (cubriendo desde aproximadamente los 77 m hasta los 3.500 m) y baja resolución 72 m (Que cubre desde aproximadamente los 2500 m hasta los 8000).

### Radiómetro Microondas (MWR)

Los procesos dispersivos en el Valle de Aburrá son debidos en su mayoría a proceso termodinámicos. Los procesos advectivos, dada la configuración del Valle tienen una influencia mínima en la dispersión de contaminantes en nuestro territorio. Por esta razón, analizar la evolución de los perfiles termodinámicos, especialmente de la temperatura potencial, es fundamental para hacer seguimiento a las condiciones de estabilidad atmosférica de la región.

Los radiómetros microondas (MWR) son sensores remotos pasivos que generan perfiles continuos de temperatura, humedad relativa, vapor de agua y agua líquida de la atmósfera con un alcance de hasta 10 km en la vertical. Son herramientas importantes en el estudio de la CLA de acuerdo con su estructura termodinámica.

Como parte de su red de sensores remotos, el SIATA cuenta con un radiómetro MP-3000A (Ver Figura 13.3), diseñado y construido por Radiometrics Corporation instalado en el punto más alto de la Torre SIATA, a aproximadamente unos 60 m de la superficie. El MP-3000A cuenta con receptores en dos bandas del espectro microondas, 22-30 GHz y 51-59 GHz. La primera banda contiene canales que entregan información acerca de los perfiles de humedad en la atmósfera, mientras que la segunda banda contiene información acerca de la temperatura. Algoritmos de inversión basados en redes neuronales son implementados para obtener los perfiles termodinámicos a partir de las señales de temperatura de brillo recibidas por el sensor.



**Figura 13.3:** Radiómetro Microondas MP-3000A.

Los perfiles resultantes tienen una resolución temporal de 2 minutos, por otra parte, la resolución vertical es variable comenzando con 50 m desde la superficie hasta los 500m, luego cada 100 m hasta los 2 km y finalmente cada 250 m hasta los 10 km, para un total de 58 niveles reportados para cada perfil.

## Scanning Lidar

Los sistemas LIDAR son sensores remotos activos cuyo concepto de funcionamiento se basa en emitir pulsos de luz en una banda de frecuencia determinada y captar la señal que es enviada de regreso al interactuar con las partículas presentes en la atmósfera. Al medir el tiempo que transcurre entre la emisión del pulso de luz y la recepción de la respuesta, el sistema puede determinar la distancia a la que se ubica la partícula que interactúa con el pulso retrodispersando parte de su señal.

A partir del año 2018 la red de monitoreo de calidad de aire cuenta con un LR101-ESS-D200 elastic depolarization Scanning LIDAR diseñado y desarrollado por Raymetrics S.A., instalado en la universidad EAFIT desde febrero de dicho año. Este Lidar cuenta con un láser con una frecuencia de 355 nm y tiene la capacidad de medir la señal recibida en dos canales de polarización diferentes (paralela y perpendicular), lo que permite ahondar en propiedades de las partículas como su forma y tamaño. Adicionalmente, el Lidar cuenta con la capacidad de girar sobre su eje en sentido azimutal y zenital, permitiendo realizar

escaneos de la atmósfera en diferentes direcciones. La información que provee este equipo permite analizar la variabilidad espacial y temporal de los aerosoles y nubes presentes en la atmósfera del valle y hasta una altura superior a los 10 km.



**Figura 13.4:** LR101-ESS-D200 elastic depolarization Scanning LIDAR.

## 14 Resumen Episodios Críticos 2018

El presente capítulo tiene el fin de hacer un recuento o síntesis de lo ocurrido en términos climáticos, meteorológicos y de calidad del aire durante los episodios críticos de los meses de marzo y octubre de 2018. Este análisis se hace en el marco de las medidas del estado de prevención adoptadas por los 10 Municipios del Área metropolitana del Valle de Aburrá.

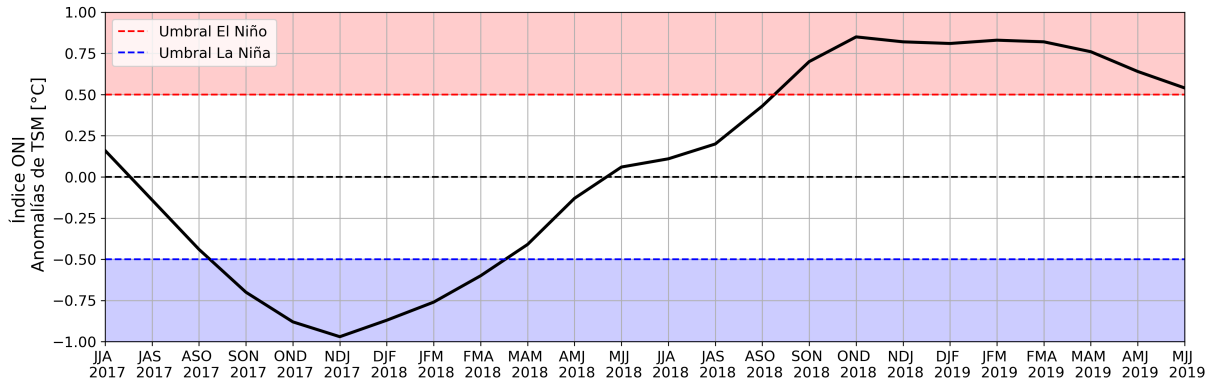
Los resultados aquí descritos fueron igualmente presentados dentro de los reportes técnicos de calidad del aire, que son diariamente entregados por SIATA durante episodios críticos. Estos informes sirven de apoyo para la gestión de dichos eventos y la toma de decisiones de manera oportuna. Sus resultados se basan principalmente en análisis holístico de las variables monitoreadas por los diferentes sensores de la red, entre los que se incluyen sensores de calidad del aire y sensores remotos los cuales son descritos en el Capítulo 13.

El contaminante PM<sub>2.5</sub> tiene un ciclo anual marcado en el Valle de Aburrá que se caracteriza por tener dos picos máximos en el año, uno más pronunciado en el mes de marzo y otro, condicional, entre los meses de octubre. Estos picos se relacionan principalmente con la transición a las dos temporadas de lluvia que tradicionalmente se observan sobre la región, con picos máximos de lluvia en abril y noviembre, los cuales corresponden al paso de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) sobre la región.

Los condiciones de transición que se dan típicamente entre los meses de Marzo y octubre, se caracterizan por ser críticas en relación al estado de la calidad del aire del Valle de Aburrá. La presencia permanente de capas de nubes de baja altura impide la entrada eficiente de radiación a la superficie y en consecuencia, la energía disponible no es suficiente para activar la convección y con ella el ascenso de las parcelas de aire y dispersión vertical de los contaminantes, rompiendo el ciclo diurno típico de estabilidad/inestabilidad de días secos. Como consecuencia, la recirculación al interior del Valle de las emisiones en superficie conducen a un aumento paulatino de la concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y de los Índices de Calidad del Aire.

Fenómenos climáticos de carácter global tales como el ENSO (El Niño Oscilación del Sur), la MJO (Oscilación de Madden-Julian), entre otros, también modulan la intensidad y características de cada episodio crítico de calidad de aire. Las anomalías en la temperatura superficial del océano pacifico son usualmente utilizadas como indicadores de condiciones Niño o Niña. En particular, anomalías superiores a 0.5 °C indican condiciones Niño, mientras anomalías inferiores a 0.5 °C corresponden a condiciones Niña.

Tal y como se evidencia a través de la Figura 14.1, el primer semestre del año 2018, corresponde a un periodo de finalización de un evento Niña, mientras que el segundo semestre del año corresponde al inicio de un evento Niño. Dichos eventos, tienen implicaciones meteorológicas locales, con incidencia específica en las condiciones de dispersión de los contaminantes en el Valle de Aburrá. En particular, condiciones Niño alargan el periodo de transición entre condiciones secas y lluviosas dentro del valle, favoreciendo la presencia permanente de nubes de baja altura y por ende la acumulación de contaminantes en superficie.

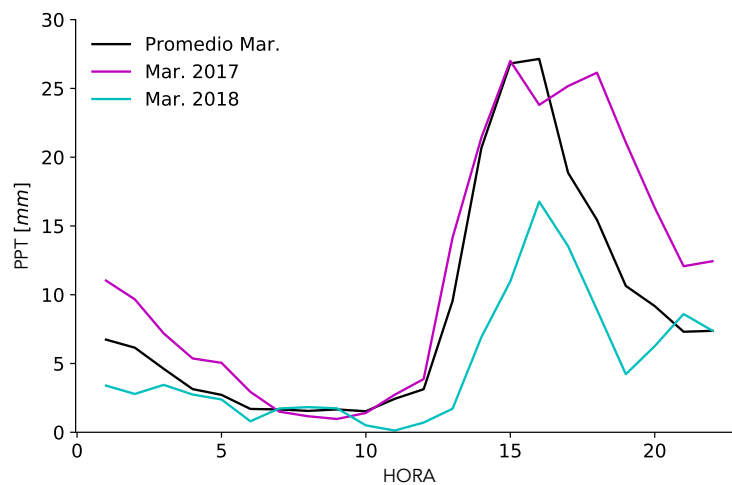


**Figura 14.1:** Serie de tiempo del Índice NINO3.4 entre Junio del 2017 y junio del 2019. Los periodos sombreados en rojo indican que las anomalías de temperatura superficial del mar han superado el umbral de definición de episodios El Niño, mientras que los periodos en azul corresponden a eventos La Niña. Las líneas punteadas señalan este umbral de  $\pm 0.5C$ .

### Episodio Febrero-Marzo-Abril

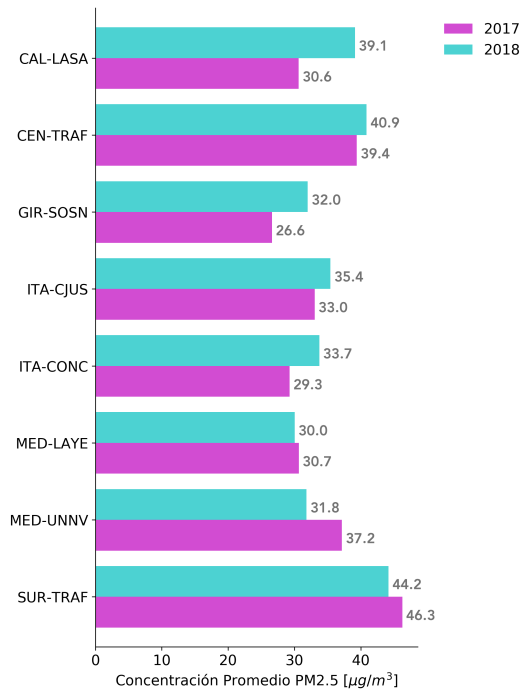
El 23 de febrero del 2018 se da inicio al estado de prevención de calidad del aire en el valle de Aburrá, luego de dos días continuos con ICA Naranja (dañino para la salud de grupos sensibles) en diferentes estaciones de la red.

En términos meteorológicos Marzo del 2018 fue mucho menos favorable para la remoción de aerosoles atmosféricos en comparación con Marzo del 2017. La Figura 14.2 presenta el ciclo diario de la precipitación durante Marzo 2017, Marzo 2018 y el promedio de los Marzos. Como se observa, Marzo de 2017 presentó acumulados de lluvia nocturna superiores al promedio de los marzos, mientras que los acumulados durante el 2018 fueron inferiores al promedio. Los eventos de lluvia nocturna, favorecen el lavado efectivo de aerosoles atmosféricos, y por consiguiente, contribuyen a la reducción en la concentración de Material Particulado.



**Figura 14.2:** Ciclo diario de la precipitación en Marzo del 2017, 2018 y el promedio de los marzos dentro del valle de Aburrá.

Sumado esto, marzo del 2018 se caracterizó por la presencia continua de nubes de baja altura que impidieron el ingreso efectivo de radiación solar a la superficie, por lo cual, la atmósfera a lo largo del mes alcanzó de forma parcial la inestabilidad cerca de las 11:00 am, como resultado de la inhibición de los procesos convectivos. Dado esto, sólo algunas de las estaciones presentaron promedios inferiores de PM2.5 durante marzo 2018 en comparación con marzo 2017. Debido principalmente a la atipicidad de los acumulados de lluvia nocturna durante el 2017.



**Figura 14.3:** Concentración promedio mensual de PM2.5 para las estaciones del valle de Aburrá durante marzo del 2017 y 2018.

Dado lo anterior y con el fin de evaluar la efectividad de las medidas a corto plazo adoptadas por el AMVA, se analiza lo sucedido entre los días 06 y 08 de Marzo del 2018. Dada la acumulación de días con condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión vertical de contaminantes, el 06 de marzo del 2018, 13 de las 19 estaciones POECA registraron ICA Rojo (dañino para la salud) tal y como se evidencia a partir de la Figura 14.4, en este momento las medidas fueron elevadas a nivel de alerta, incrementándose las restricciones tanto para la industria como de movilidad. Luego de la implementación de las medidas, Las concentraciones promedio de 24 horas se redujeron entre 20 y 30 microgramos por metro cúbico en las diferentes estaciones desde el día 06 hasta el día 08, lo cual representa una disminución de más del 40% desde el momento en que se tomaron las medidas. Los picos máximos horarios también bajaron de manera considerable como resultado de las medidas en un 30-40% en las diferentes estaciones de monitoreo en Medellín y el Valle de Aburrá. La Figura 14.5 presenta a modo de ejemplo la reducción en la concentración de PM2.5 registrada para esos días en la estación MED-UNNV.

PM2.5	Marzo																															
	J1	V2	S3	D4	L5	M6	Mi7	J8	V9	S10	D11	L12	Mi13	Mi14	J15	V16	S17	D18	L19	M20	Mi21	J22	V23	S24	D25	L26	M27	Mi28	J29	V30	S31	
<b>Estaciones</b>	DE REPRESENTACIÓN POBLACIONAL																															
Barbosa	22	31	28	29	37	58	49	15	13	14	12	24	25	23	31	27	25	21	28	29	31	30	29	26	13	22	16	28	18	8	11	
Torre Social	27	35	33	30	42	64	52	23	17	19	19	30	31	26	36	35	31	28	38	39	37	39	39	30	22	30	26	37	29	17	17	
Girardota	28	32	30	27	36	56	43	23	14	16	15	21	30	25	30	28	23	23	29	32	32	36	33	26	18	21	20	29	21	13	11	
SOS Aburrá Norte	27	30	37	26	32	55	39	24	15	15	12	23	30	25	30	28	22	23	30	32	33	38	30	26	19	22	23	30	25	12	12	
Copacabana	43	40	37	32	42	60	42	29	17	22	17	28	37	28	37	32	30	32	36	37	37	44	42	39	27	31	26	36	31	17	17	
Ciudadela Educativa de la Vida	25	29	28	25	28	35	26	15	12	13	13	21	26	22	27	26	23	25	25	39	30	36	27	23	20	23	23	27	26	12	14	
Bello	37	43	41	36	41	57	40	*	16	19	15	28	35	26	35	30	29	29	33	39	36	39	35	33	21	28	27	34	29	14	15	
I.E. Fernando Vélez	31	36	31	31	37	58	35	17	12	12	*	22	29	27	36	26	23	32	33	39	31	42	35	34	22	29	26	35	35	17	13	
Medellín - Aranjuez	30	26	33	26	31	46	34	24	16	21	19	29	34	25	33	30	28	35	36	39	35	38	33	31	22	27	27	28	28	13	17	
I.E. Ciro Mendía	27	32	32	26	*	*	33	22	17	19	15	27	36	29	36	32	28	28	30	36	37	44	36	29	23	25	25	29	24	12	15	
Medellín - San Cristóbal	31	37	30	30	38	58	31	19	13	13	10	19	28	24	35	29	24	28	32	36	31	43	37	26	23	27	25	32	27	13	11	
Parque Biblioteca Fernando Botero	33	35	34	29	36	55	35	24	21	26	21	32	39	33	41	42	35	35	42	47	45	49	46	38	32	39	34	37	31	18	21	
Medellín - Centro occidente	36	46	31	36	39	69	37	21	15	19	9	16	28	27	36	33	22	32	31	40	29	49	36	23	18	26	30	40	27	14	12	
Universidad Nacional sede El Volador	29	33	32	32	38	60	37	23	20	20	20	29	31	26	40	37	34	33	38	52	41	52	41	30	29	37	44	40	34	11	12	
Medellín - Villahermosa	31	37	30	29	39	56	37	20	16	14	12	20	29	26	33	30	23	28	31	39	36	45	*	22	20	24	27	35	27	15	11	
Planta de agua potable de EPM	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	29	36	29	38	31	21	21	27	25	32	24	11	10
Medellín - Belén	29	32	32	30	34	56	33	20	17	15	13	23	32	25	34	29	26	25	30	40	30	43	31	22	19	28	31	35	29	15	15	
I.E. Pedro Justo Berrio	34	39	33	28	37	60	35	25	19	18	15	24	35	29	38	34	26	27	31	41	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Medellín - Altavista	39	48	43	37	44	71	42	36	27	22	17	30	46	39	51	47	37	34	38	48	47	52	39	24	32	43	45	47	37	23	17	
I.E. Pedro Octavio Amado	31	38	31	32	35	59	36	30	21	18	17	28	39	34	46	40	31	32	33	41	43	47	36	18	24	34	35	40	25	14	10	
Medellín - El Poblado	DE TRÁFICO																															
I.E. INEM sede Santa Catalina	42	50	44	37	52	68	49	39	21	26	20	37	45	39	49	44	39	34	41	54	55	58	49	43	29	37	33	43	*	20	22	
Itagüí	46	50	48	41	51	76	48	36	33	33	27	43	56	41	56	50	41	38	41	58	55	67	57	40	36	46	41	39	32	16	16	
Casa de Justicia	(*) Datos estimados a partir de modelación estadística																															
Medellín - El Poblado																																
Tanques La Ye EPM																																
Itagüí																																
I.E. Concejo Municipal de Itagüí																																
Envigado																																
E.S.E Santa Gertrudis																																
Sabaneta																																
I.E. Rafael J. Mejía																																
La Estrella																																
Hospital																																
Sabaneta																																
I.E. Jose Félix de Restrepo																																
Caldas																																
Corp. Universitaria Lasallista																																
Caldas																																
E U Joaquin Aristizabal																																

Figura 14.4: Índice de Calidad del Aire (ICA) para todas las estaciones de PM2.5 durante Marzo del 2018.

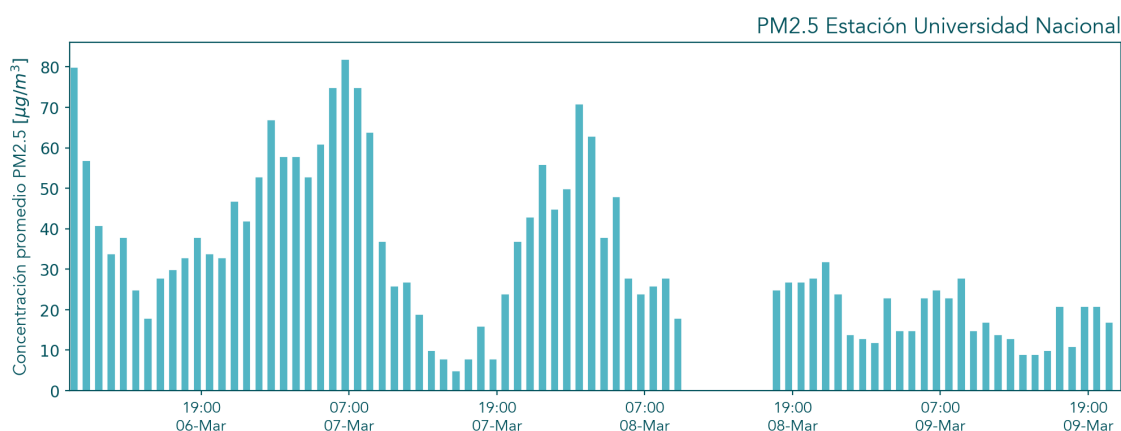


Figura 14.5: Concentración de PM2.5 durante el 06 y 08 de Marzo del 2018 en la estación MED-UNNV.

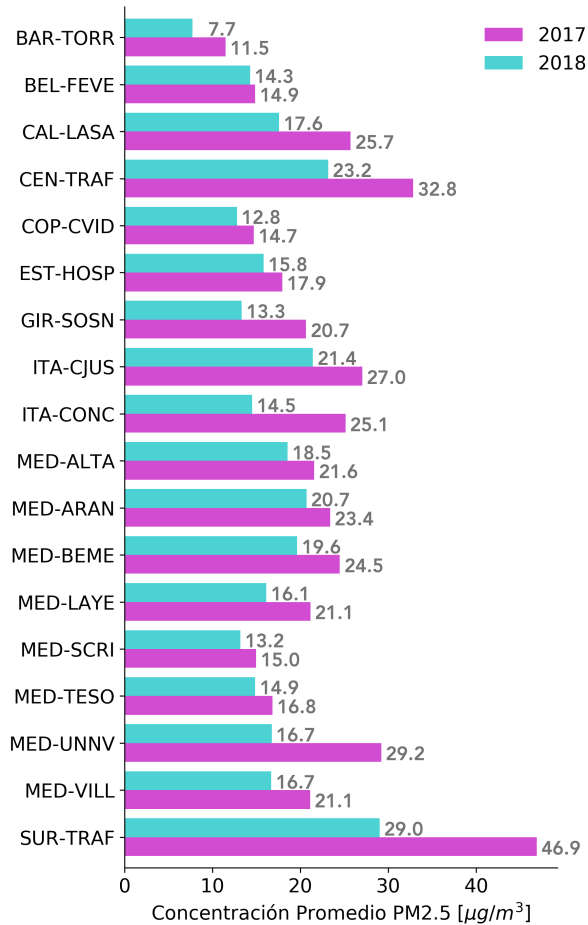
Dada la reducción significativa del tráfico vehicular y por tanto de las emisiones en superficie, característicos de la Semana Santa, durante los días 25 de marzo y 1ero de abril, las medidas restrictivas de

nivel de prevención fueron levantadas, sin embargo las concentraciones de PM2.5 permaneció en principalmente bajo los umbrales de ICA amarillo y verde. El estado de prevención fue retomado nuevamente una vez finalizada la semana santa, el día 02 de abril y finalizó completamente el 06, dando fin al episodio crítico de calidad del aire.

## Episodio Octubre

Dada la incidencia del evento Niño en la dispersión de contaminantes dentro del valle de Aburrá, el estado de prevención por calidad del aire fue declarado el 1ero de octubre de 2018 y tuvo una duración de 27 días. De acuerdo a las implicaciones climáticas de los evento Niño, octubre de 2017 presentó unas mejores condiciones para la dispersión de contaminantes que octubre de 2018.

Con el fin de evaluar la efectividad de las medidas de corto plazo adoptadas, las cuales se suman a los resultados de las estrategias de largo plazo, se realiza una comparación entre las concentración promedio mensual para octubre de 2017 y octubre de 2018 (ambos con corte al 25 de Octubre) para las diferentes estaciones del valle (ver Figura 14.6). En todas las estaciones que hacen parte de la red de monitoreo, la concentración de PM2.5 del 2018 y para el periodo mencionado fue inferior en comparación al año anterior. Cabe resaltar que las estaciones de tráfico, especialmente la estación tráfico sur (SUR-TRAF), fueron las que presentaron las mayores disminuciones a nivel porcentual, pasando así de una concentración de  $46.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a una de  $27.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación Tráfico Sur. Esto como resultado de las medidas de corto plazo y los avances que se vienen logrando en la integralidad de las medidas de largo plazo, las cuales se enfocan principalmente en las emisiones de fuentes móviles.



**Figura 14.6:** Concentración promedio mensual de PM2.5 para las estaciones del valle de Aburrá durante octubre del 2017 y 2018.

Desde el punto de vista de los índices de calidad de aire -ICA- diarios, se observa en las Figuras 14.7 y 14.8 que las condiciones de calidad del aire fueron igualmente mejores para el 2018 que para el 2017, con un total de 59 ICA verde, 41 Naranjas y 4 rojos para octubre del 2017 y 158 ICA verde, 4 Naranjas y 0 rojos con corte al 25 de octubre del 2018. Siendo esto evidencia de la efectividad de las medidas tomadas por el AMVA a corto y largo plazo.

# Informe Anual de Calidad del Aire 2018

## Contrato Ciencia y Tecnología 504 de 2019

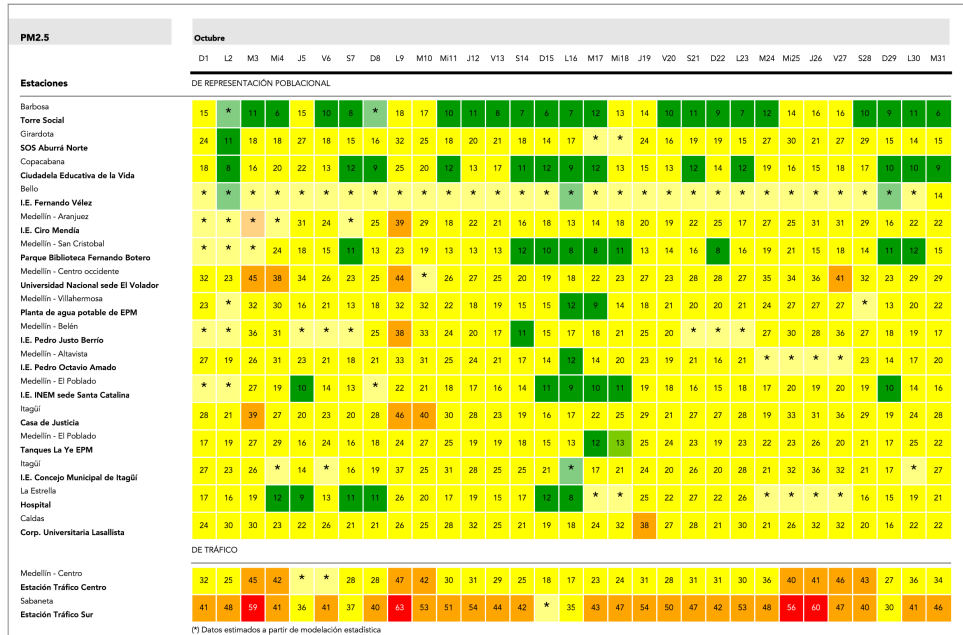
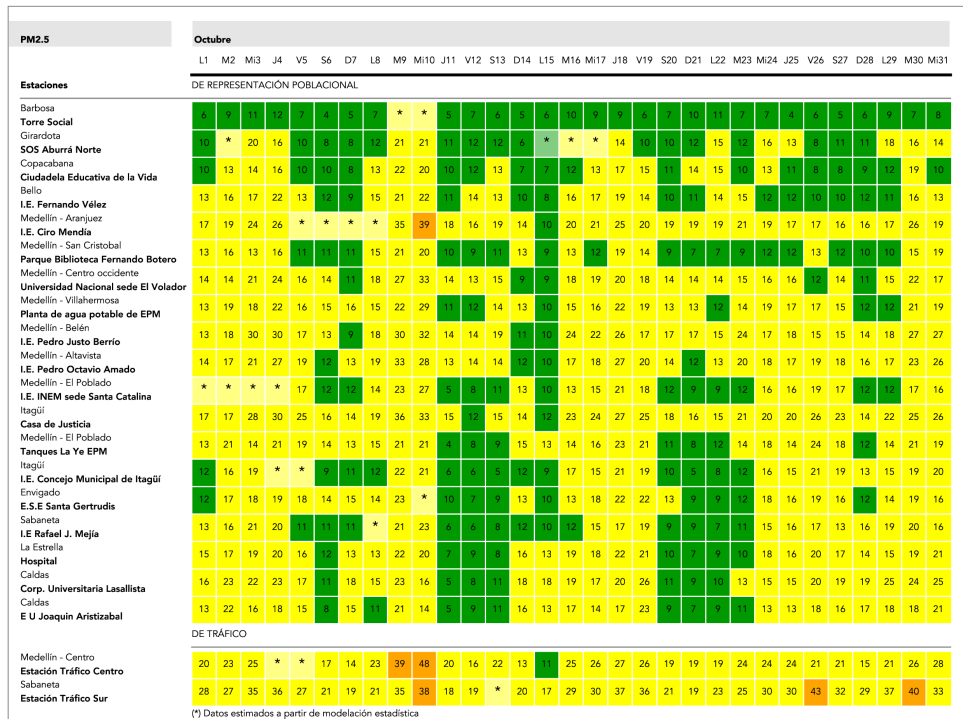


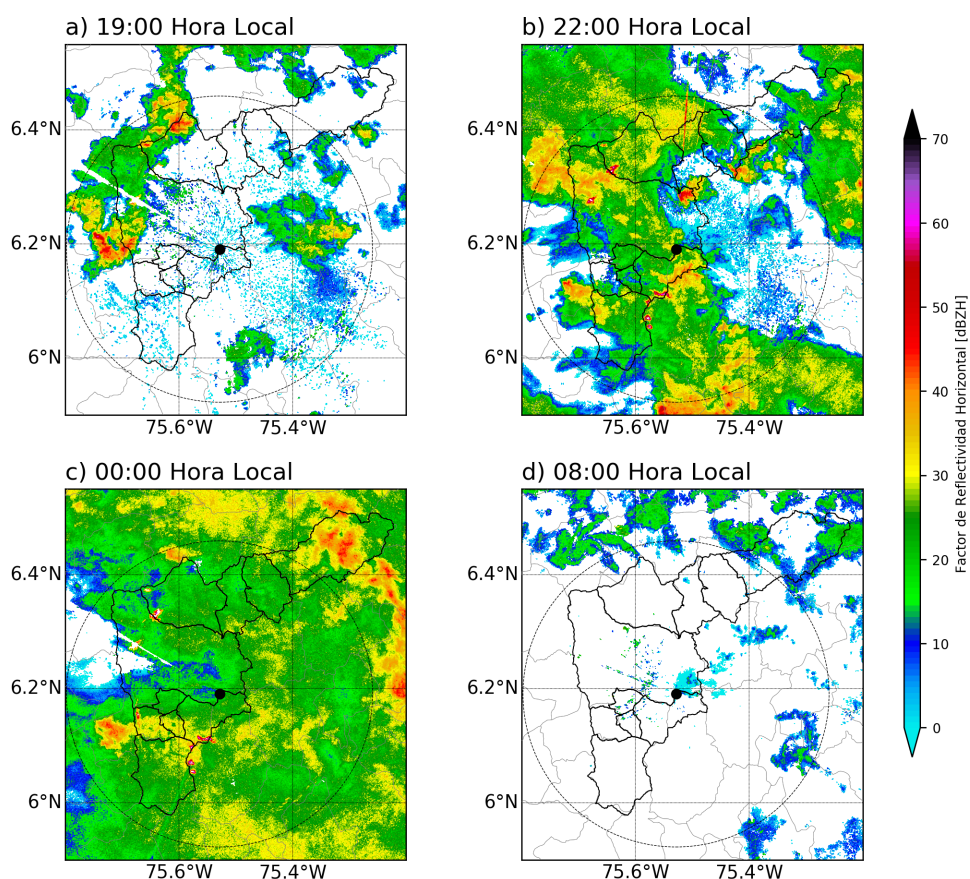
Figura 14.7: Índice de Calidad del Aire (ICA) para todas las estaciones de PM2.5 durante Octubre del 2017.



El mes de octubre de 2018 se caracterizó por presentar condiciones moderadas y buenas de calidad del aire. La segunda semana del mes (entre el Lunes 8 y el Domingo 14), las condiciones fueron las menos favorables para la dispersión de contaminantes desde el punto de vista meteorológico, debido a la predominancia de la estabilidad atmosférica a lo largo de varios días, lo cual influyó en la acumulación de contaminantes cerca de la superficie y por ende la presencia de condiciones de ICA Naranja en 3 estaciones del valle, incluidas las dos estaciones de tráfico. En este punto se hace evidente el papel de las medidas, dado que bajo condiciones desfavorables como las presentadas durante estas fechas, la gran mayoría de estaciones permanecieron bajo el umbral de ICA amarillo, y ninguna alcanzó el umbral rojo.

Durante la noche del 10 y la madrugada del 11 se presentó un evento de precipitación de larga duración (Ver Figura 14.9), que comenzó cerca de las 7:00 pm y finalizó alrededor de las 08:00 am. Dicho evento logró disminuir de manera efectiva la concentración de partículas en la atmósfera, y por ende se presenta la marcada diferencia entre la concentración de PM<sub>2.5</sub> para los días 10 y 11 de octubre. Los días posteriores a esto se mantuvieron bajas concentraciones como resultado de la disminución en las emisiones vehiculares durante el fin de semana festivo del 15 de octubre.

Con la consolidación de la temporada de lluvia las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> permaneció por debajo del umbral de ICA Naranja, favorecido en parte por la precipitación nocturna y las medidas adoptadas.



**Figura 14.9:** Precipitación nocturna entre el 10 y el 11 de Octubre del 2018.

Finalmente se resalta como una de las principales evidencias del impacto de las medidas a corto plazo adoptadas durante el episodio crítico, el retraso de una hora en el pico máximo de la concentración de

PM2.5 durante el mes de octubre. La Figura 14.10 presenta el ciclo diurno de la concentración horaria de PM2.5 para el valle de Aburrá durante octubre del 2017 y 2018. Como primera conclusión es evidente como la concentración durante el 2018 es inferior al 2017, sin embargo, también es posible observar como el valor máximo pasa de ser a las 8:00 am durante el 2017 a ser a las 9:00 am durante el 2018. La explicación para esto, se encuentra en la medida de pico y placa ambiental para camiones y volquetas con modelo inferior o igual al 2009, estos vehículos comenzaron su recorrido luego de las 8:30 am, momento en el cual finalizaba la medida de pico y placa.

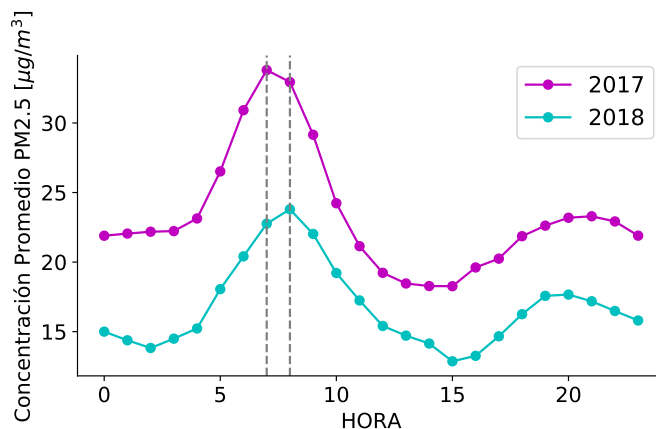


Figura 14.10: Ciclo diurno de la concentración de PM2.5 durante octubre del 2017 y 2018.

## 15 Anexos

### Anexo 1. Métodos de medición

**Tabla 15.1:** Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA

Contaminante	Método/Procedimiento	Estado del Contaminante	Rango de operación del equipo
PM10	Toma de muestras para la determinación de la concentración de partículas menores a $10 \mu m$ en el aire ambiente, U.S. EPA RFNA 0202-141 E-CFR Título 40, Parte 50, Capítulo I, Subcapítulo C, Apéndice J. Alto Volumen PM10, Procedimiento P-GAA-RA-03.	Particulado	$2-750 \mu g/m^3$
PM10	Determinación directa en campo de la concentración de partículas menores a $10 \mu m$ en el aire ambiente, Método equivalente automático U.S. EPA EQPM-0798-122 Monitor de Partículas BAM-1020. Procedimiento P-GAA-RA-05.	Particulado	$0-1000 \mu g/m^3$
PM2.5	Determinación directa en campo de la concentración de partículas menores a $2.5 \mu m$ en el aire ambiente, método equivalente automático U.S. EPA EQPM-0308-170 Monitor de Partículas BAM-1020. Procedimiento P-GAA-RA-05.	Particulado	$0-1000 \mu g/m^3$
PM2.5	Determinación directa en campo de la concentración de partículas menores a $2.5 \mu m$ en el aire ambiente, método equivalente automático U.S. EPA EQPM-0715-266 Monitor de Partículas BAM-1020. Procedimiento P-GAA-RA-05.	Particulado	$0-1000 \mu g/m^3$
PM2.5	Toma de muestras para la determinación de la concentración de partículas menores a $2.5 \mu m$ en el aire ambiente U.S EPA EQPM-1013-209. Monitor de Partículas BAM1022. Procedimiento P-GAA-RA-17.	Particulado	$2-200 \mu g/m^3$

**Tabla 15.1:** Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA

Contaminante	Método/Procedimiento	Estado del Contaminante	Rango de operación del equipo
PM2.5	Toma de muestras para la determinación de la concentración de partículas menores a 2.5 $\mu m$ en el aire ambiente, Método Referencia U.S. EPA RFPS-0498-116, CFR Título 40, parte 50, Capítulo I, Subcapítulo C, Apéndice L. Medición continua mediante muestreados de aire BGI modelo PQ200. Bajo Volumen. Procedimiento P-GAA-RA-10.	Particulado	2-200 $\mu g/m^3$
Ozono	Determinación directa en campo de la concentración de ozono $O_3$ en el aire ambiente, método equivalente U.S. EPA-EQOA-0880-047 CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Medición continua mediante fotometría UV. Modelo 49C Marca Thermo. Procedimiento P-GAA-RA-07.	Gaseoso	0-50 ppb 0-1000 ppb (0 – 98,15 $\mu g/m^3$ 0-1963,07 $\mu g/m^3$ )
Ozono	Determinación directa en campo de la concentración de ozono $O_3$ en el aire ambiente, método equivalente U.S. EPA-EQOA-0992-087 CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice D. Medición continua mediante fotometría UV. Modelo 400E marca Teledyne. Procedimiento P-GAA-RA-12.	Gaseoso	0-100 ppb 0-10000 ppb (0 – 196,31 $\mu g/m^3$ 0-19630,67 $\mu g/m^3$ )
CO	Determinación directa en campo de la concentración de Monóxido de Carbono CO en el aire ambiente, método de referencia U.S. EPA RFCA-0981-054 CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice C. Medición continua espectrometría infrarroja no dispersiva. Modelo 48C Marca Thermo. Procedimiento P-GAA-RA-11.	Gaseoso	0-1 ppm 0-1000 ppm (0 – 1145,60 $\mu g/m^3$ 0 – 1145603,27 $\mu g/m^3$ )
CO	Determinación directa en campo de la concentración de Monóxido de Carbono CO en el aire ambiente, método automático de referencia U.S. EPA-RFCA-1093-093 CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice C. Mediante continua mediante fotometría infrarroja no dispersiva. Modelo 300E, marca Teledyne. Procedimiento P-GAA-RA-08.	Gaseoso	0-1 ppm 0-1000 ppm (0 – 1145,60 $\mu g/m^3$ 0 – 1145603,27 $\mu g/m^3$ )

**Tabla 15.1:** Métodos y rangos de operación para los equipos pertenecientes a la REDMCA

Contaminante	Método/Procedimiento	Estado del Contaminante	Rango de operación del equipo
SO <sub>2</sub>	Determinación de Dióxido de Azufre SO <sub>2</sub> en el aire ambiente, Método automático equivalente EPA-EQSA-0495-100 Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice A1, Modelo 100E, marca Teledyne. Procedimiento P-GAA-RA-09.	Gaseoso	0-20 ppb 0-20000 ppb (0-52,40 µg/m <sup>3</sup> 0-52399,18 µg/m <sup>3</sup> )
NO <sub>x</sub>	Determinación de Óxido de Nitrógeno NO <sub>x</sub> en el aire ambiente, Método automático de Referencia RFNA-1194-099 CFR Título 40, Capítulo I, Subcapítulo C, Parte 50, Apéndice F. Medición continua mediante la aplicación del método de quimiluminiscencia, modelo 200E marca Teledyne. Procedimiento PGAA-RA-13.	Gaseoso	0-50 ppb 0-20000 ppb
PM1	Toma de muestras para la determinación de la concentración partículas menores a 1 micra (PM1) en el aire ambiente. Medición continua mediante monitor de partículas E-BAM). Procedimiento P-GAA-RA-02.	Particulado	5 – 65530 µg/m <sup>3</sup>
	Toma de muestras para la determinación de concentración de contaminantes en el aire ambiente, mediante la utilización de Tecnología Análítica con el Analizador Portatil AQM 60 Compact AIR Quality Station MARCA AERQUAL. Procedimiento P-GAA-RA-01.	Gaseoso	según contaminante

**Tabla 15.2:** Método utilizado dentro de la red de ruido

Variable	Método
Ruido Ambiental	Procedimiento de Medición para Ruido Ambiental. Capítulo II, Anexo 3 de la Resolución 0627 del 7 de abril de 2006 del entonces Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible. Procedimiento P-GAA-RA-14.

## Anexo 2. Desarrollo investigativo respecto a la calidad del aire

Adjunto al presente documento, en "InvestigacionesQA2018.zip" se almacenan las investigaciones adelantadas y/o culminadas en el transcurso del año 2018.

## Referencias

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Clasificación Estaciones de Monitoreo de Calidad del Aire. (256), 2014.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2015. 2015.
- Gabriel Jaime and Maya Vasco. Relación entre las partículas finas (pm2.5) y respirables (pm10) en la ciudad de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 7(12):23–42, 2008.
- WHO Joint, World Health Organization, et al. Health risks of particulate matter from long-range trans-boundary air pollution. Technical report, Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2006.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Manual de operacion de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. pages 1–142, 2010.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Relación 2254 del 2017. (Noviembre), 2017.
- U.S. Environmental Protection Agency. A Guide to Air Quality and Your Health. (February), 2014.

---

FIN DEL INFORME

---