

**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL  
PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN  
EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**

**Ing. JAVIER ENRIQUE TRUJILLO CAMACHO**

Director:

**Ph.D JAROL DERLEY RAMÓN VALENCIA**

**PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUIMICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURAS  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA, 2017**



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**

**Ing. JAVIER ENRIQUE TRUJILLO CAMACHO**

**Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:

**Ph.D JAROL DERLEY RAMÓN VALENCIA**

**PROGRAMA DE MAESTRIA EN INGENIERIA AMBIENTAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL, AMBIENTAL Y QUIMICA  
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS  
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA  
PAMPLONA, 2017**



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**NOTA DE ACEPTACION**

---

---

---

---

**JURADO**

---

**JURADO**

**Pamplona, 2017**



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



A Dios, quien permitió lograr sacar adelante esta meta y a mi esposa e hijas por el apoyo en todo momento, la paciencia que me han brindado, por sus privaciones y desvelos, además de la confianza que me han depositado.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **AGRADECIMIENTOS**

Este proyecto es producto del esfuerzo realizado en el cual han colaborado un grupo importante de profesionales que han aportado ideas, críticas y comentarios. A todos los más sinceros agradecimientos.

Un reconocimiento especial por su interés inestimable y desinteresado para los Doctores Jarol Ramón Valencia y Jacipt Ramón Valencia, cuyo respaldo académico resulto decisivo para el desarrollo del proyecto.

A la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR por el apoyo y subsidio prestado para el desarrollo de mi formación académica.

A todas aquellas personas que de una u otra forma aportaron información, ideas y sugerencias que permitieron sacar adelante el proyecto.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**TABLA DE CONTENIDO**

1.	RESUMEN .....	13
2.	INTRODUCCIÓN .....	14
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
4.	JUSTIFICACIÓN .....	16
5.	OBJETIVOS .....	17
5.1	OBJETIVO GENERAL.....	17
5.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	17
6.	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	18
6.1	ALCANCES .....	18
6.2	LIMITACIONES .....	18
7.	ANTEDECENTES.....	19
7.1	INTERNACIONAL.....	19
7.2	NACIONAL .....	20
8.	MARCO CONCEPTUAL.....	23
9.	MARCO CONTEXTUAL .....	26
9.1	LOCALIZACIÓN GENERAL DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA .....	26
9.2	ZONA DE ESTUDIO.....	27
10.	MARCO LEGAL .....	29
11.	MARCO TEÓRICO.....	32
11.1	CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	32
11.1.1	Tipos de fuentes .....	33
11.2	PARTICULAS EN SUSPENSIÓN .....	35
11.2.1	Material Particulado (PM <sub>10</sub> ) .....	35
11.2.2	Fuentes de generación .....	36
11.2.3	Efectos sobre la salud y medio ambiente.....	36
11.2.4	Proceso y equipo de medición.....	38



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



11.3 METALES PESADOS .....	40
11.3.2 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA).....	42
11.4 INDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA).....	43
12. METODOLOGÍA.....	45
12.1 GENERACIÓN Y VALIDACIÓN BASE DE DATOS.....	46
12.2 COMPORTAMIENTO ESPACIO- TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO (PM <sub>10</sub> ).....	48
12.3 ESTIMACIÓN DE METALES PESADOS.....	49
12.3.1 Muestreo .....	49
12.3.2 Detección y análisis de metales .....	49
12.4 CÁLCULO DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA) .....	50
12.5 REPRESENTACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	50
12.5.1 Concentraciones de material particulado (PM <sub>10</sub> ) .....	50
12.5.2 Concentraciones de metales pesados .....	50
12.5.3 Índice de Calidad de Aire (ICA) .....	51
13. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	52
13.1 GENERACIÓN Y VALIDACIÓN BASE DE DATOS.....	52
13.2 COMPORTAMIENTO ESPACIO- TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO (PM <sub>10</sub> ).....	54
13.3 CÁLCULO DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA) .....	66
13.4 REPRESENTACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	69
13.4.1 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL ANUAL .....	69
13.4.2 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL MENSUAL MULTIANUAL.....	82
13.4.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL MULTIANUAL.....	91
13.5 DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS.....	94
13.5.1 Longitud de Onda .....	94
13.5.2 Concentraciones de Metales Pesados (µg/m <sup>3</sup> ) .....	95
14. CONCLUSIONES.....	104
15. RECOMENDACIONES .....	107
16. REFERENCIAS.....	108



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1</b>	Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio .....	30
<b>Tabla 2</b>	Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia .....	30
<b>Tabla 3</b>	Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio .....	31
<b>Tabla 4</b>	Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia. ....	31
<b>Tabla 5</b>	Clasificación del Índice de la Calidad del Aire de acuerdo con el intervalo .....	43
<b>Tabla 6.</b>	Estadística descriptiva de PM <sub>10</sub> y variables meteorológicas.....	54
<b>Tabla 7</b>	Cumplimiento del límite anual PM <sub>10</sub> del monitoreo 2010-2016.....	56
<b>Tabla 8</b>	Coeficiente de correlación para PM <sub>10</sub> -Estación Cinera y variables meteorológicas.....	58
<b>Tabla 9</b>	Coeficiente de correlación para PM <sub>10</sub> -Estación Sena y variables meteorológicas.....	59
<b>Tabla 10</b>	Coeficiente de correlación para PM <sub>10</sub> -Estación Panamericana y variables meteorológicas.....	60
<b>Tabla 11.</b>	Tasas de mortalidad y morbilidad, municipio de Cúcuta (2010-2016)...	67
<b>Tabla 12</b>	Longitud de Onda para la determinación de Metales Pesados .....	94
<b>Tabla 13</b>	Concentraciones de metales pesados determinados .....	95



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**LISTA DE FIGURAS**

<b>Figura 1</b>	Localización general municipio de San José de Cúcuta. ....	26
<b>Figura 2</b>	Localización general zona de estudio.....	27
<b>Figura 3</b>	Elementos de la contaminación atmosférica .....	32
<b>Figura 4</b>	Relación entre contaminación del aire y efectos de las emisiones a la salud. .....	33
<b>Figura 5</b>	Tipos de material particulado.....	35
<b>Figura 6</b>	Distribución trimodal típica de las partículas atmosféricas.....	36
<b>Figura 7</b>	Material particulado en el cuerpo humano.....	37
<b>Figura 8</b>	Partes del equipo muestreador Hi Vol .....	39
<b>Figura 9</b>	Componentes de un espectrofotómetro de absorción atómica .....	43
<b>Figura 10</b>	Metodología de la investigación.....	45
<b>Figura 11</b>	Metodología para la toma de muestra .....	46
<b>Figura 12</b>	Proceso de validación de la base de datos .....	47
<b>Figura 13</b>	Metodología para el análisis del comportamiento espacio-temporal del material particulado PM <sub>10</sub> .....	48
<b>Figura 14</b>	Metodología para la determinación de metales pesados en el laboratorio .....	49
<b>Figura 15</b>	Control de la toma de muestra (2010-2016).....	53
<b>Figura 16</b>	Valores anuales de Material Particulado PM <sub>10</sub> (2010-2016).....	55
<b>Figura 17</b>	Valores anuales de Material Particulado PM <sub>10</sub> (2010-2016) vs Limite anual permisible. ....	57
<b>Figura 18</b>	Comportamiento mensual multianual de material particulado (2010-2016) .....	57
<b>Figura 19</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Temperatura (2010-2016).....	61
<b>Figura 20</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Precipitación (2010-2016).....	62
<b>Figura 21</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Humedad Relativa (2010-2016).....	63
<b>Figura 22</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Brillo Solar (2010-2016).....	64
<b>Figura 23</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Velocidad del Viento (2010-2016).....	65
<b>Figura 24</b>	Comportamiento temporal del material particulado PM <sub>10</sub> vs Evaporación (2010-2016).....	66
<b>Figura 25</b>	Valores anuales de material particulado PM <sub>10</sub> vs Tasa de morbilidad..	68
<b>Figura 26</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> año 2010 .....	70



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



<b>Figura 27</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2010 .....	70
<b>Figura 28</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2010 .....	71
<b>Figura 29</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2011 .....	72
<b>Figura 30</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> año 2011.....	72
<b>Figura 31</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2011 .....	73
<b>Figura 32</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> año 2012.....	74
<b>Figura 33</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2012 .....	74
<b>Figura 34</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2012 .....	75
<b>Figura 35</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> año 2013.....	76
<b>Figura 36</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2013 .....	76
<b>Figura 37</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2013 .....	77
<b>Figura 38</b>	Material Particulado año 2014 .....	78
<b>Figura 39</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2014 .....	78
<b>Figura 40</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2014 .....	79
<b>Figura 41</b>	Material Particulado año 2015 .....	80
<b>Figura 42</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2015 .....	80
<b>Figura 43</b>	Material Particulado año 2016 .....	81
<b>Figura 44</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) 2016 .....	82
<b>Figura 45</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Marzo .....	83
<b>Figura 46</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Marzo .....	83
<b>Figura 47</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Abril.....	84
<b>Figura 48</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Abril .....	85
<b>Figura 49</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Mayo .....	86
<b>Figura 50</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Mayo.....	86
<b>Figura 51</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Junio .....	87
<b>Figura 52</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Junio.....	88
<b>Figura 53</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Agosto .....	89
<b>Figura 54</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Agosto .....	89
<b>Figura 55</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Septiembre .....	90
<b>Figura 56</b>	Índice de Calidad de Aire (ICA) Septiembre.....	91
<b>Figura 57</b>	Índice de Calidad del Aire Multianual.....	92
<b>Figura 58</b>	Material Particulado PM <sub>10</sub> Multianual.....	92
<b>Figura 59</b>	Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias Multianual (2010-2014).....	93
<b>Figura 60</b>	Longitud de Onda para la determinación de Metales Pesados.....	95
<b>Figura 61</b>	Concentración de Metales Pesados en muestras de PM <sub>10</sub> .....	96
<b>Figura 62</b>	Concentración de Plomo (Pb) µg/m <sup>3</sup> .....	96
<b>Figura 63</b>	Distribución espacial del Plomo .....	97
<b>Figura 64</b>	Concentración de Zinc (Zn) µg/m <sup>3</sup> .....	98
<b>Figura 65</b>	Distribución espacial del Zinc .....	98
<b>Figura 66</b>	Concentración de Manganeseo (Mn) µg/m <sup>3</sup> .....	99



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



<b>Figura 67</b>	Distribución espacial del Manganeso .....	99
<b>Figura 68</b>	Concentración de Cobre (Cu) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	100
<b>Figura 69</b>	Distribución espacial del Cobre .....	100
<b>Figura 70</b>	Concentración de Cromo (Cr) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	101
<b>Figura 71</b>	Distribución espacial del Cromo .....	102
<b>Figura 72</b>	Metales Pesados vs Material Particulado PM <sub>10</sub> , noviembre de 2015..	103



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**LISTA DE ANEXOS**

**ANEXO I.** Base de datos concentraciones material particulado PM<sub>10</sub>.

**ANEXO II.** Base de datos meteorológicos estación Camilo Daza.

**ANEXO III.** Cálculo Índice de Calidad de Aire (ICA).

**ANEXO IV.** Sistemas de Información Geográfica.

**ANEXO V.** Evidencia fotográfica.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## 1. RESUMEN

La calidad del aire presenta gran influencia sobre la salud humana y en la actualidad es un aspecto de gran importancia que aquejan a la población mundial. Se han presentado diversos episodios de contaminación en el mundo por diferentes contaminantes presentes en el aire que han afectado drásticamente poblaciones a corto, mediano y largo plazo. La calidad del aire se monitorea constantemente en el municipio de San José de Cúcuta con el fin de controlar y vigilar los niveles de contaminación por material particulado (PM<sub>10</sub>) en diferentes áreas que pueden ser influenciados por diversas fuentes como flujo vehicular, quema de combustibles fósiles y procesos industriales. La Red de Calidad de Aire de Cúcuta cuenta con tres estaciones de monitoreo con equipos Hi-Vol para PM<sub>10</sub> ubicadas en diferentes zonas del municipio, por esta razón, se determinó las zonas que presenten mayor concentración de material particulado (PM<sub>10</sub>) durante el periodo 2010-2016, y así mismo, se analizó el comportamiento de este contaminante con las variables meteorológicas de la estación climatológica ordinaria Camilo Daza.

En este contexto, se realizó un análisis espacio temporal durante el periodo 2010-2016 referente a la contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> y metales pesados identificados por Espectrofotometría de Absorción Atómica en el laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona. Además, se determinó El Índice de Calidad de Aire (ICA) establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) y el cumplimiento con la Resolución 610 de 2010 (Norma Colombiana), la normativa de la Environmental Protection Agency (EPA) y la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El área aferente a la estación Panamericana presenta la mayor contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> y metales pesados debido a la actividad antropogénica que presenta la zona y el arrastre de contaminantes por la influencia del viento: por otra parte, el área aferente a la estación Cinera presenta la menor afectación por estos contaminantes. Es por esto que el norte de Cúcuta se considera más propenso a riesgos a la salud humana, aunque las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> no superen los niveles excepcionales establecidos en la resolución 610 de 2010.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **2. INTRODUCCIÓN**

La calidad del aire y sus efectos sobre la salud humana son aspectos de gran importancia que aquejan a la población mundial en la actualidad. Se han presentado diversos episodios de contaminación en el mundo por diferentes contaminantes presentes en el aire que han afectado drásticamente poblaciones a corto, mediano y largo plazo. Sin embargo, las normativas se han vuelto más rigurosas en cuanto a calidad de aire se refiere, estableciendo protocolos y estudios de diversos contaminantes que pueden estar presentes en el aire identificando las fuentes y su comportamiento a través del tiempo.

La emisión de contaminantes primarios generados por la actividad antropogénica provoca una alteración en la dinámica de la atmósfera, causando efectos adversos sobre el ambiente y la salud humana. En este contexto, se hace necesario estudiar la evolución del comportamiento de los contaminantes respecto a diversos factores como la naturaleza física y química de los contaminantes, las características meteorológicas del ambiente, el terreno sobre el cual se transportan y se difunden, y la altura de las fuentes respecto a la superficie.

La calidad del aire se monitorea constantemente en la ciudad de Cúcuta con el fin de controlar y vigilar los niveles de contaminación por material particulado (PM<sub>10</sub>) en diferentes áreas que pueden ser influenciados por diversas fuentes como flujo vehicular, quema de combustibles fósiles y procesos industriales, entre otros, que impactan directa e indirectamente a la población del municipio de San José de Cúcuta. Por esta razón, es importante determinar las zonas que presenten mayor concentración de material particulado (PM<sub>10</sub>) durante el periodo 2010-2016.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La contaminación del aire representa un importante riesgo para la salud, tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo o tercermundistas (Arciniegas et al., 2005). Dentro de los principales contaminantes se encuentra las partículas suspendidas totales (PST), así mismo el material particulado PM<sub>10</sub> y el PM<sub>2.5</sub>, los cuales presentan su foco de emisión por fuentes móviles y puntuales, principalmente por la combustión no solo de combustibles fósiles sino en general cualquier tipo de combustible, siendo el PM<sub>10</sub> el de mayor repercusión sobre la contaminación global en general y la salud humana (OMS, 2014).

El material particulado puede contener otro tipo de contaminantes como algunos tipos de hidrocarburos y metales pesados que, dependiendo de su concentración, tiempo de exposición y toxicidad del mismo pueden llegar a ser mortales o causar grandes problemas en la salud a corto o largo plazo.

El presente proyecto se desarrolló por la necesidad de determinar las áreas donde se presenten elevadas concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub>), en el aire del municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander. Lo anterior es una preocupación progresiva para la red de calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), debido al crecimiento desproporcionado de la ciudad, en cuanto a la población, cantidad y tipos de vehículos, y variedad de industrias en la zona de estudio. (CORPONOR, 2015),

De acuerdo a lo anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación ¿Cuál es el comportamiento espacio-temporal del material particulado (PM<sub>10</sub>) presente en el municipio de San José de Cúcuta durante el periodo 2010-2016?



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



#### **4. JUSTIFICACIÓN**

La exposición al material particulado se ha asociado de manera significativa con los efectos agudos y crónicos en la salud por exposición a largo plazo (Finkelman J., et al., 1994). La vía de entrada al organismo de las partículas en suspensión es la inhalatoria, es por esto que el sistema respiratorio es el más afectado por la exposición de estos contaminantes generando enfermedades como la pulmonar obstructiva crónica, neumonía, bronquitis, y el sistema cardiovascular (infartos). (Arciniegas et al., 2005).

Es de gran importancia tanto para los entes territoriales como para las autoridades ambientales competentes determinar las zonas con mayores concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> en el municipio, puesto que se conoce el riesgo potencial de estos contaminantes en la salud humana, con la finalidad de garantizar el bienestar de los habitantes.

La investigación brindará herramientas para la toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales competentes y de los entes territoriales respecto a la concentración de material particulado PM<sub>10</sub> en el municipio de Cúcuta. Así mismo, será referente para el análisis de otros contaminantes que se pueden encontrar en el PM<sub>10</sub> producto de las actividades antrópicas desarrolladas diariamente.



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GENERAL**

Determinar el índice de calidad del aire por material particulado (PM<sub>10</sub>) aplicado al periodo de muestreo 2010-2016 en el municipio de San Jose de Cúcuta, Norte de Santander

### **5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Generar y validar la base de datos de calidad del aire por el indicador PM<sub>10</sub> y variables meteorológicas para el municipio de San José de Cúcuta, durante el periodo 2010–2016.
- Estudiar el comportamiento espacio temporal de las concentraciones del contaminante PM<sub>10</sub> y las variables meteorológicas de la zona de estudio para el período 2010-2016.
- Estimar las concentraciones de los metales pesados (Pb, Zn, Cd, Cu, Mn y Cr) presentes en el material particulado (PM<sub>10</sub>) del municipio de San José de Cúcuta.
- Calcular el Índice de Calidad del Aire (ICA) establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) para las concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub>) presentes en el área del municipio de San José de Cúcuta.
- Representar el comportamiento espacial de las concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub>), metales pesados y el Índice de Calidad de Aire (ICA) utilizando Sistemas de Información Geográfica.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **6. ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **6.1 ALCANCES**

La investigación comprende puntualmente el análisis de la contaminación atmosférica generada por material particulado PM<sub>10</sub> para el periodo 2010-2016 en el municipio de San José de Cúcuta. A su vez, incluye la determinación de metales pesados presentes en el material particulado PM<sub>10</sub> por medio de la técnica de espectrometría de absorción atómica.

### **6.2 LIMITACIONES**

Restricciones a la investigación relacionadas con:

- La red de calidad del aire de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) solo cuenta con tres estaciones en el municipio de Cúcuta, que miden material particulado PM<sub>10</sub>.
- Número de filtros de material particulado PM<sub>10</sub> disponibles para la identificación de metales pesados.
- Disponibilidad de los datos de la estación climatológica ordinaria Camilo Daza del IDEAM, ubicada en el aeropuerto de Cúcuta.
- La Red de Monitoreo de Calidad de Aire de CORPONOR no tenía disponibilidad de los datos diarios de material particulado PM<sub>10</sub> para los años 2015-2016. Sin embargo, se contó con los valores mensuales de PM<sub>10</sub> para realizar el análisis propuesto.



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 7. ANTEDECENTES

La contaminación ambiental no es algo del siglo XX, siempre ha existido, pues es parte fundamental de la naturaleza. Sin embargo, en los últimos años se ha convertido en un serio problema. Hasta hace pocas décadas no se consideraba un problema ya que apenas se ha logrado demostrar fehacientemente lo serio del asunto, considerando los efectos negativos que esta tiene sobre el ambiente y la salud (Gutiérrez, 2011). El tema de contaminación del aire empezó a ser un problema para los científicos al presentarse eventos como los de Meuse Valley en 1930, donde murieron más de 60 personas por emisiones de SO<sub>2</sub> y fluorocarbonados; el de Donora Pensilvania en 1948, dando muerte a más de 20 personas por emisiones de material particulado, y el más importante, en Londres en 1952 con la muerte de más de 4,000 personas también por presencia de partículas en exceso en el ambiente. Esto dio la alerta para tomar medidas radicales a nivel mundial en términos políticos y científicos (De Nevers, 1998).

#### 7.1 INTERNACIONAL

Internacionalmente se han realizado gran cantidad de estudios referentes a las partículas en suspensión direccionando la investigación a efectos sobre la salud humana y su comportamiento tanto espacial como temporal.

En el 2005, la Organización Mundial de la Salud (OMS) realizó un estudio de comparación de las distintas regiones en el mundo, concluyendo que Asia y Latinoamérica tienen concentraciones mayores de PM<sub>10</sub>, que Europa y Norteamérica debiéndose principalmente a su crecimiento en producción industrial y el uso de combustibles de baja calidad. Con respecto al SO<sub>2</sub>, se encontró que hay altos niveles de concentración en algunas ciudades de China debido al incremento en el uso del carbón como fuente de energía y algunas ciudades de África que presentan concentraciones medias anuales de 100 µg/m<sup>3</sup>. Hoy en día, la norma de límite dada por la OMS es de 24 µg/m<sup>3</sup> en 24 horas. (WHO, 2005)

En la ciudad de Tabasco, estado Cunduacán, México; Pérez et al., (2010) midieron concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y material particulado PM<sub>10</sub> durante el periodo de 2001 y 2003; en los resultados se excedió la norma de PM<sub>10</sub>, de acuerdo a lo anterior se detectaron problemas de contaminación cuyos efectos aún no han sido evaluados.

Fuenzalida (2015) modeló la exposición de material particulado PM<sub>10</sub> a partir de los datos registrados en 108 estaciones de monitoreo pertenecientes al Sistema



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Nacional de Calidad del Aire de Chile, utilizando de geo estadística aplicada por el modelo de Kriging ordinario obteniendo superficie de valores estimados de exposición de material particulado PM<sub>10</sub>, la mayor presencia de este contaminante se encontró en territorios de clúster minero.

## **7.2 NACIONAL**

La contaminación atmosférica en Colombia atraviesa por un gran auge debido a sus impactos generados. Las partículas en suspensión han sido uno de los contaminantes más estudiados, así mismo sus focos de emisión, dispersión y efectos sobre la salud humana.

Hoy en día en Colombia, el 74% de la población identifica a la contaminación del aire como uno de los problemas más serios en el país, además porque afecta directamente a la población de bajos recursos. Genera aproximadamente 7000 casos de muertes prematuras anuales, 7400 nuevos casos de bronquitis crónica, 13000 hospitalizaciones por causa de enfermedad respiratoria crónica y 255000 visitas a salas de urgencia (Larner, 2004).

En la localidad de Puente Aranda, Bogotá, Arciniegas & Rodríguez (2005) analizaron la relación entre la morbilidad en los niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda (ERA) y la concentración de material particulado utilizando un modelo lineal generalizado (Regresión de Poisson) en el periodo comprendido entre enero y junio de 2005, generando así mapas de riesgos de la población susceptible y finalmente encontrando asociaciones positivas entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y el número de enfermedades respiratorias.

Cancino (2006) realizó un análisis del estado de la calidad de aire en la ciudad de Bogotá D.C con énfasis en la evolución de la contaminación de PM<sub>10</sub> de acuerdo a la información proporcionada por la red de calidad del aire de Bogotá, determinando que las concentraciones de PM<sub>10</sub> sobrepasan de forma consistente la normativa establecida presentándose las mayores concentraciones en Puente Aranda, Fontibón, Corpas y Sony, excediendo la norma anual más del 80% del tiempo

En Riohacha, Rojano et al (2013), midieron los niveles de partículas suspendidas totales (PST) y partículas menores de 10 y 2.5 micrómetros en su zona urbana. Se utilizaron seis estaciones y todas presentaron buena correlación PST/PM<sub>10</sub>. De acuerdo a lo anterior se concluyó que las PST pueden contener partículas PM<sub>10</sub>; no obstante, las partículas PM<sub>10</sub> no necesariamente presentan partículas PM<sub>2.5</sub>.

En la ciudad de Medellín, Londoño et al (2015) utilizaron la geo estadística para caracterizar espacialmente datos de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**





de nueve sitios de monitoreo en valor promedio mensual durante el periodo comprendido entre 2003 y 2007, evaluando diferentes modelos mediante pruebas de validación cruzada. Se eligió el modelo j-bessel como el más óptimo. De esta manera se representaron mapas de predicción con Kriging ordinario y sistemas de información geográfica.

El material particulado PM<sub>10</sub> es una fracción respirable, es decir la cantidad de aire que respiramos o inhalamos y que ingresa directamente a nuestros pulmones por medio del aparato respiratorio también conocido como polvo en suspensión (Quijano, 2010). El PM<sub>10</sub> es uno de los contaminantes de calidad del aire más importantes y que tiene repercusiones sobre la salud humana. Según Velazco G. Mauricio (2005), se considera que alrededor de 27 metales son tóxicos en mayor o menor proporción, siendo los de mayor peligro en el aire mercurio (Hg), níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), berilio (Be) y antimonio (Sb), siendo su foco de emisión de origen industrial.

Machado (2008), realizó una investigación en una zona de alto tráfico vehicular en el estado de Zulia, Venezuela determinando metales pesados (Pb, Ni, Zn y Cr) en muestras de aire y sedimentos viales tomando 3 zonas de muestreo emisión dispersión y referencia, comparando de esta manera las concentraciones de estos metales en las zonas, analizando las influencias de distintas variables y determinando la calidad del aire en la ciudad de Maracaibo.

Quijano (2013) y Velazco (2005), determinaron metales pesados en Villa del Rosario y Manizales respectivamente hallando gran influencia de metales como Ca, Fe, Pb, K, Cr, Zn, Cd y Mn, producto de la actividad antropogénica por fuentes móviles y fijas.

Contreras, C (2015) realizó una evaluación de los efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire para el sector ciudadela norte de la ciudad de Ocaña, Norte de Santander; este estudio fue realizado en el periodo de diciembre 6 de 2014 a diciembre 5 de 2015, con el objetivo de evaluar los impactos en la salud debido al material particulado (<10 µm) mediante la Red de Monitoreo de calidad del Aire “UFPSO – CORPONOR” y registros del Hospital de la respectiva ciudad, con el fin de hallar la correlación entre la concentración del contaminante y el número de casos de tipo respiratorio. La población objetivo estuvo conformada por el número total de pacientes cuya zona de residencia se encuentra en el sector Ciudadela Norte; que acudieron al servicio de consulta externa, hospitalización y urgencias; por enfermedades respiratorias. Los resultados obtenidos mostraron que la mayoría de meses se mantienen por debajo de los estándares nacionales de calidad del aire, aunque se presentaron “picos” de contaminación en los cuales se superaron los

	<p><b>DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.</b></p>	 <b>CORPONOR</b>
---	---	--

estándares de calidad del aire de la EPA y el límite máximo permisible establecido en la Resolución 610 de 2010.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **8. MARCO CONCEPTUAL**

**AIRE:** Es el fluido que forma la atmósfera de la tierra, constituido por una mezcla de gases cuya composición es aproximadamente 20% oxígeno, 77% nitrógeno y porciones variables de gases inertes y vapor de agua, en relación volumétrica.

**AMENAZA:** Es el posible riesgo que una situación, fenómeno, proceso natural o causado por el ser humano que puede poner en peligro la salud y bienestar.

**ÁREA- FUENTE:** Es una determinada zona o región, urbana, suburbana o rural, que, por albergar múltiples fuentes fijas de emisión, es considerada como un área especialmente generadora de sustancias contaminantes del aire.

**ATMÓSFERA:** Capa gaseosa que rodea la tierra.

**CALIDAD DE AIRE:** Trata de las condiciones del aire que presentan en un lugar determinado.

**CONCENTRACIÓN DE UNA SUSTANCIA EN EL AIRE:** Es la relación que existe entre el peso o el volumen de una sustancia y la unidad de volumen de aire en la cual está contenida.

**CONDICIONES DE REFERENCIA:** Son los valores de temperatura y presión con base en los cuales se fijan las normas de calidad del aire y de las emisiones, que respectivamente equivalen a 25 °C y 760 mm Hg (1 atmosfera de presión).

**CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA:** Es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes presentes en el aire.

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

**EFFECTOS EN LA SALUD:** Es la incidencia que tiene la contaminación del aire, provocando en una población enfermedades o el aumento de enfermedades por las altas concentraciones de un contaminante, Los efectos más graves se producen en las personas que ya están enfermas.

**EMISIÓN:** Es la descarga de un elemento o sustancia en el aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, proveniente de una fuente fija o móvil.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**EPISODIO:** Es la ocurrencia de un estado tal de contaminación de contaminantes en el aire puesto que dado sus valores y tiempo de exposición superan los valores normales.

**FRACCION RESPIRABLE:** Material particulado que debido a su diámetro puede ingresar al sistema respiratorio.

**FUENTE FIJA:** Es la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.

**FUENTE MÓVIL:** Es la fuente de emisión que debido a su uso es susceptible de desplazarse, como lo son los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.

**GEOESTADISTICA APLICADA:** Permite explorar la variabilidad de los datos y examinar tendencias globales creando predicciones y calculando los errores de predicción.

**INMISIÓN:** Transferencia de contaminantes de la atmosfera a un receptor. Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión. Aire inamisible es el aire respirable a nivel de la troposfera.

**LIMITES MÁXIMOS PERMISIBLES:** Son los niveles permisibles que establece la autoridad ambiental competente, con el objeto de cumplir la norma de calidad de aire.

**MATERIAL PARTICULADO PM<sub>10</sub>:** Material particulado con un diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micrómetros nominales.

**MONITOREO AMBIENTAL:** Actividad consistente en efectuar observaciones, mediciones y evaluaciones continuas de una característica, elemento, parámetro o de un proceso en un sitio o periodo determinados, con el objeto de verificar los impactos y riesgos potenciales hacia el ambiente y la salud pública.

**NORMA DE CALIDAD DE AIRE:** Son los niveles y demás parámetros permisibles de sustancias o fenómenos contaminantes presentes en el aire, establecidas por el Ministerio del Medio Ambiente, con el fin de preservar la buena calidad del medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana.

**PARTE INTERESADA:** Persona o población que tiene interés por el tema a tratar en vista de que está afectado y requiere estar informado.

**RIESGO:** Es una medida de la magnitud de los daños frente a una situación peligrosa



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**SISTEMA DE VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE:** Conjunto de equipos de medición de calidad del aire instalados sistemáticamente para verificar el cumplimiento de uno o varios de los objetivos de vigilancia de calidad del aire previstos en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.

**TIEMPO DE EXPOSICIÓN:** Es el lapso de tiempo de duración en un episodio o evento de contaminación.



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.

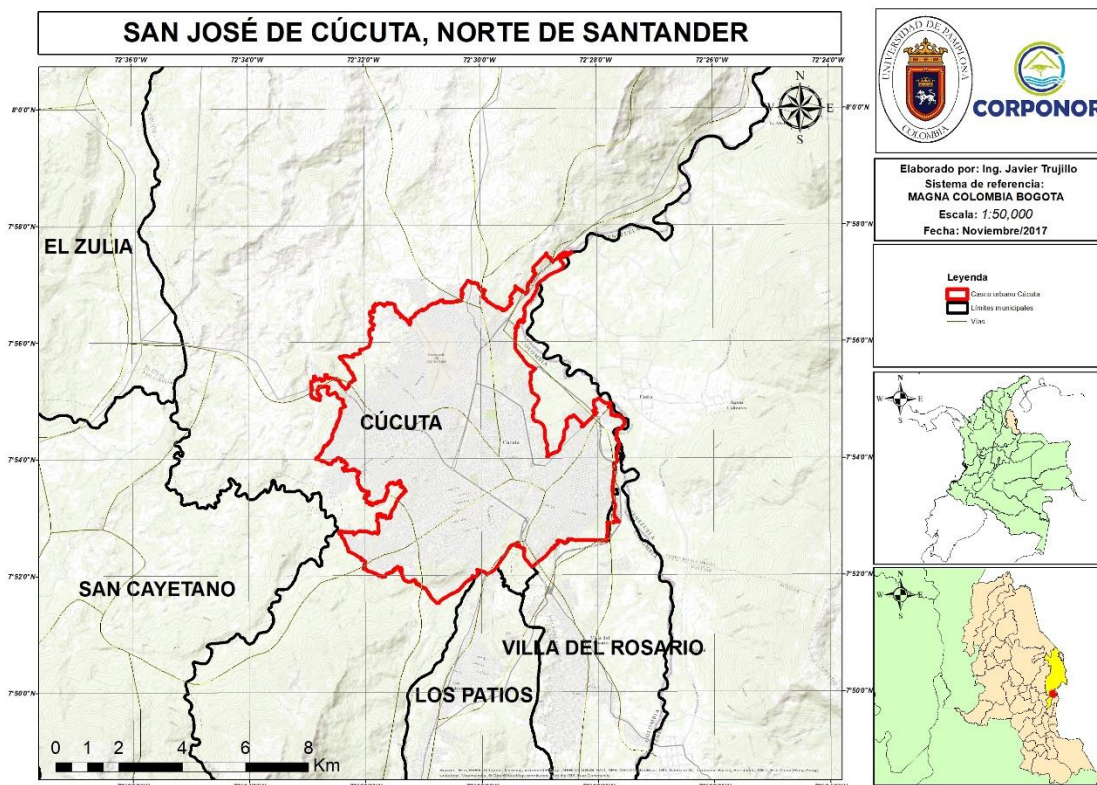


### 9. MARCO CONTEXTUAL

#### 9.1 LOCALIZACIÓN GENERAL DEL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA

El Municipio de Cúcuta se localiza en la cordillera oriental en el departamento de Norte de Santander, a una altitud de 320 msnm, entre el valle de los Ríos Táchira y Zulia, la atraviesa el Rio Pamplonita. Tiene una extensión de 113.130 Ha de las cuales 4.778 corresponden al área urbana y 108.352 corresponden al área rural, lo que demuestra que la mayoría del terreno es territorio rural. Desde el punto de vista territorial el municipio es eminentemente rural, desde el punto de vista poblacional el municipio es eminentemente urbano. Limita al norte con los municipios de Tibú, Puerto Santander y la República de Venezuela, al sur con los municipios de Bochalema, Los Patios y Villa del Rosario, al oriente con la República de Venezuela y al occidente con los municipios de Sardinata, El Zulia y San Cayetano (Alcaldía de Cúcuta, 2010). En la figura 1 se presenta la localización general del municipio de San José de Cúcuta.

Figura 1 Localización general municipio de San José de Cúcuta.



Fuente: ArcGis. Editado por Trujillo, J (2017)



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.

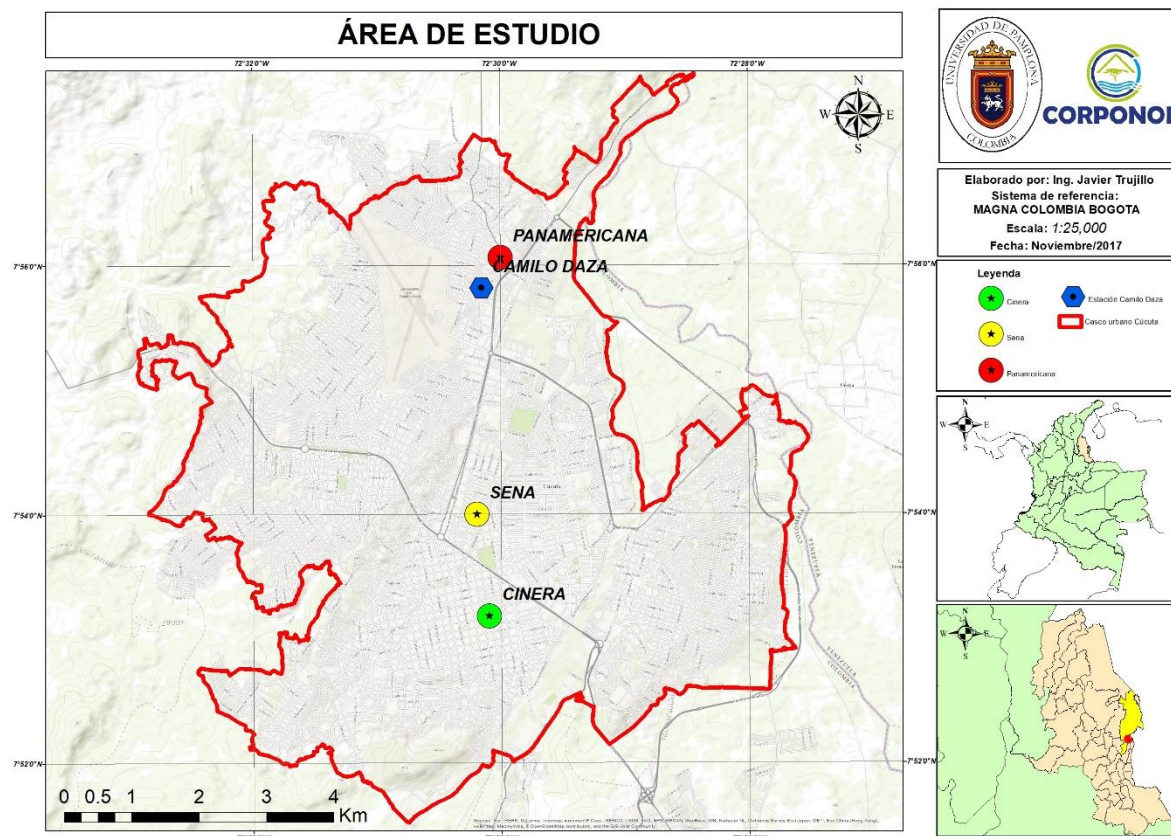


La población en el municipio se concentra en el núcleo urbano principal, manteniendo la tendencia de localización en el casco urbano principal. Según el último censo del DANE, la población de Cúcuta asciende en el año 2.005 a 587.000 habitantes, de los cuales 567.664 habitan en el casco urbano y 19.336 en el área rural, proporcionalmente cuenta con un 97% en el área urbana y un 3% en el área rural.

### 9.2 ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está compuesta por tres estaciones de calidad del aire que miden PM<sub>10</sub>; estas componen la red de vigilancia de la calidad de aire, las cuales fueron instaladas en el año 2009 por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). Las estaciones son: Cinera, Sena y Panamericana. En la figura 2 representa la localización de las 3 estaciones de monitoreo de material particulado PM<sub>10</sub> y la estación meteorológica Camilo Daza, ubicada en el aeropuerto del municipio.

Figura 2 Localización general zona de estudio





**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



La contaminación atmosférica generada por fuentes móviles y fijas en Cúcuta se cataloga como un tema de conflicto; las fuentes fijas de contaminación atmosférica, localizadas en los diferentes corredores industriales del Área Metropolitana de Cúcuta, representadas por 212 industrias, de las 262 existentes en el departamento (el 83% de las empresas presentaban concentración de partículas suspendidas totales, de las cuales el 50% no cumplían con las normas de emisión de acuerdo al Decreto 02 de 1982, el 75% incumplían las normas anuales calculadas y un 80% de las industrias cumplían con la norma de la calidad del aire en 24 horas). (Alcaldía de Cúcuta, 2010).

La red de la calidad del aire permite el acopio de información para la toma de decisiones en materia de políticas de control de la contaminación atmosférica y la evaluación del impacto de la misma, también permite informar a los ciudadanos sobre los niveles de contaminación del aire en los distintos sectores productivos cumpliendo con su objetivo principal, el cual es ejercer control, seguimiento y monitoreo a las fuentes fijas y móviles de contaminación atmosférica en el área metropolitana de Cúcuta (CORPONOR, 2009).



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **10. MARCO LEGAL**

En general, la normativa colombiana en materia de calidad del aire y emisiones se ha planteado en función de la protección de la salud humana y el medio ambiente, desarrollada a través de un proceso de gradualidad que involucra la capacidad técnica, tecnológica y económica de una sociedad, ya que estos factores deben hacer parte de la construcción normativa de carácter técnico. Además del desarrollo normativo y de Política, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible trabaja desde diferentes frentes en la formulación de estrategias coordinadas, eficientes y equitativas dirigidas a prevenir y controlar la Contaminación del Aire en el país. A continuación, se mencionan las principales normas colombianas:

La ley 23 de 1973 se expidió con la finalidad de prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente buscando la conservación y restauración de los recursos renovables (Ley 23 de 1973). De acuerdo a esta ley se estableció en 1974 el Decreto 2811 del Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, y el Código Sanitario Nacional mediante la ley 09 de 1979, para que de esta manera el Ministerio de Salud en 1982 por medio del Decreto 02 los reglamentara de acuerdo a emisiones atmosféricas (Decreto 02 de 1982)

El Decreto 948 de 1995 expedido por el Ministerio del Medio Ambiente reglamenta la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad de aire. Este decreto estableció los mecanismos de prevención, normas de protección, control y vigilancia, y las funciones de las autoridades ambientales con respecto a la contaminación atmosférica (Decreto 948 de 1995).

El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, el 4 de abril de 2006 expidió la resolución 601 con el propósito de garantizar un ambiente sano y minimizar los riesgos sobre la salud. Esta resolución establece la norma de calidad de aire o nivel de inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. En el artículo 4 presenta los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio (tabla 1), y en el artículo 10 (tabla 2) presenta la concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia (Resolución 601 de 2006).



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Tabla 1** Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Unidad	Límite máximo permisible	Tiempo de Exposición
PST	µg/m <sup>3</sup>	100	Anual
		300	24 horas
PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>	70	Anual
		150	24 horas
SO <sub>2</sub>	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.031 (80)	Anual
		0.096 (250)	24 horas
		0.287 (750)	3 horas
NO <sub>2</sub>	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.053(100)	Anual
		0.08 (150)	24 horas
		0.106 (200)	1 horas
O <sub>3</sub>	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.041 (80)	8 horas
		0.061 (120)	1 horas
CO	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	8.8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 horas

**Fuente:** Resolución 601 de 2006

Nota: mg/m<sup>3</sup> o µg/m<sup>3</sup> a las condiciones de 298,15 °K y 101,325 KPa (25 °C y 760 mmHg).

**Tabla 2** Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia

Contaminante	Tiempo de Exposición	Unidades	Prevención	Alerta	Emergencia
PST	24 horas	µg/m <sup>3</sup>	375	625	875
PM <sub>10</sub>	24 horas	µg/m <sup>3</sup>	300	400	500
SO <sub>2</sub>	24 horas	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO <sub>2</sub>	1 horas	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O <sub>3</sub>	1 horas	ppm (µg/m <sup>3</sup> )	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	ppm (mg/m <sup>3</sup> )	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)

**Fuente:** Resolución 601 de 2006

Nota: mg/m<sup>3</sup> o µg/m<sup>3</sup> a las condiciones de 298,15 °K y 101,325 KPa (25 °C y 760 mmHg).

En el año 2010, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por medio de la Resolución 610 del 24 de marzo modifico la Resolución 601 de 2006 estableciendo en el artículo 4 y 10 los niveles máximos permisibles para contaminantes criterios (tabla 3) y la declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación de aire (tabla 4) respectivamente (Resolución 610 de 2010).



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Tabla 3** Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel máximo permisible (µg/m <sup>3</sup> )	Tiempo de Exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM <sub>10</sub>	50	Anual
	100	24 horas
PM <sub>2.5</sub>	25	Anual
	50	24 horas
SO <sub>2</sub>	80	Anual
	250	24 horas
	750	3 horas
NO <sub>2</sub>	100	Anual
	150	24 horas
	200	1 horas
O <sub>3</sub>	80	8 horas
	120	1 horas
CO	10.000	8 horas
	40.000	1 horas

Fuente: Resolución 610 de 2010

**Tabla 4** Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para los niveles de prevención, alerta y emergencia.

Contaminante	Tiempo de Exposición	Estados Excepcionales		
		Prevención (µg/m <sup>3</sup> )	Alerta (µg/m <sup>3</sup> )	Emergencia (µg/m <sup>3</sup> )
PST	24 horas	375	625	875
PM <sub>10</sub>	24 horas	300	400	500
SO <sub>2</sub>	24 horas	500	1000	1600
NO <sub>2</sub>	1 horas	400	800	2000
O <sub>3</sub>	1 horas	350	700	1000
CO	8 horas	17.000	34.000	46.000

Fuente: Resolución 610 de 2010

Posteriormente se adoptó el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad de Aire según la Resolución 650 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Resolución 650 de 2010), el cual se ajusta por medio de la Resolución 2154 de 2010 y se adoptan otras disposiciones (Resolución 2154 de 2010). Este protocolo está compuesto por tres manuales que representan los lineamientos necesarios para el diseño de sistemas de vigilancia de calidad de aire de acuerdo al Plan de Gestión de la Calidad de Aire. A continuación, se presentan los tres manuales:

1. Manual de Elaboración de Planes de Gestión de la Calidad de Aire.
2. Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad de Aire.
3. Manual de Operaciones de Sistemas de Vigilancia de la Calidad de Aire.

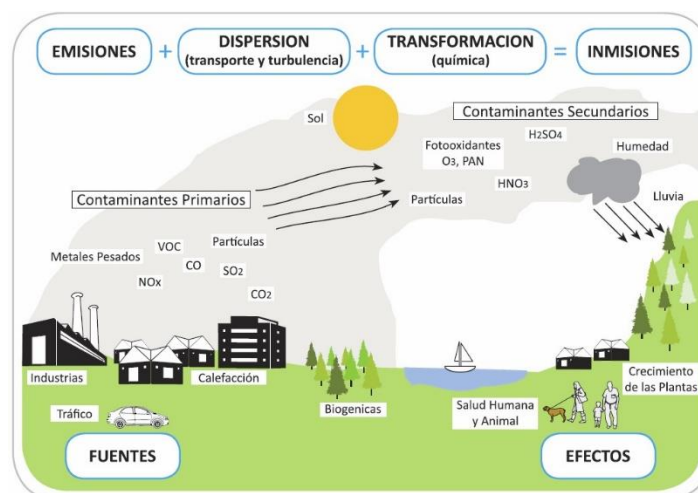
## 11. MARCO TEÓRICO

### 11.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

El nombre de contaminación atmosférica “se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perjudiciales sobre la salud de los seres vivos y los elementos materiales, y no a otras alteraciones inocuas”. Se reconocen entre las principales fuentes de este tipo de contaminación, los procesos industriales que implican combustión, tanto en industrias como en automóviles y calefacciones residenciales, generando dióxido, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, azufre, material particulado, entre otros contaminantes (Martínez, 2014).

De acuerdo con los análisis realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible la contaminación atmosférica en Colombia es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación para los colombianos por los impactos generados tanto en la salud como en el ambiente, además, es el tercer factor generador de costos sociales después de la contaminación del agua y de los desastres naturales. De acuerdo con lo establecido en el Título 5 del Decreto 1076 de 2015, la Contaminación Atmosférica es el fenómeno de acumulación o de concentración de contaminantes, entendidos estos como fenómenos físicos o sustancias o elementos en estado sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana que solos, o en combinación, o como productos de reacción, se emiten al aire como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas. (Ver figura 3).

Figura 3 Elementos de la contaminación atmosférica



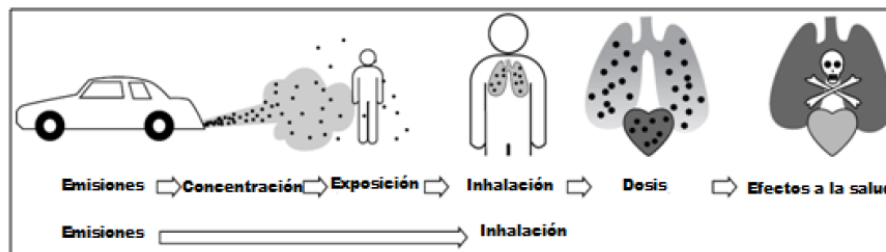
Fuente: Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

### 11.1.1 Tipos de fuentes

Las fuentes son aquellos lugares, puntuales o no, por los que se verifica el proceso de emisión. Pueden ser naturales y antropogénicas. Los lugares por los cuales los contaminantes desaparecen del aire se denominan sumideros. Entre estos está el suelo, masas de agua, vegetación estructuras, etc.

En general, para que las emisiones puedan tener efectos adversos a la salud, deben tener una línea de proceso que involucra: concentración del contaminante (masa por tiempo), fracción inhalada (masa inhalada por masa emitida) y toxicidad (impacto a la salud por masa inhalada) (Marshall & Nazaroff, 2006); de aquí, se puede establecer la relación intrínseca entre cantidad de emisiones y efectos a la salud. (Ver Figura 4)

**Figura 4** Relación entre contaminación del aire y efectos de las emisiones a la salud.



Fuente: (Marshall & Nazaroff, 2006)

La contaminación del aire incluye elementos de origen natural y emisiones resultantes de actividades humanas. Los contaminantes atmosféricos pueden ser compuestos gaseosos, aerosoles o material particulado. Entre los contaminantes gaseosos se encuentran el ozono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y compuestos volátiles orgánicos e inorgánicos. El material particulado se caracteriza, a su vez, por partículas suspendidas totales, partículas suspendidas menores a diez micras y partículas suspendidas con diámetro menor a 2.5 micras (INECC, 2007). Entre las diferentes fuentes de emisiones a la atmósfera podemos distinguir dos grandes tipos: las fuentes fijas y las móviles, las cuales se describen a continuación.



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 11.1.1.1 Fuentes fijas

Existen tres tipos de fuentes fijas generadoras de emisiones:

- **Fuentes puntuales:** Derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales como son: la química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales, entre otras. Las emisiones derivadas de la combustión utilizada para la generación de energía o vapor, dependen de la calidad de los combustibles y de la eficiencia de los quemadores, mantenimiento del equipo y de la presencia de equipo de control al final del proceso (filtros, precipitadores y lavadores, entre otros).
- **Fuentes de área:** Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas, principalmente. Esta fuente también incluye las emisiones de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo, rellenos sanitarios, entre otros.
- **Fuentes naturales:** Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, que se les denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono.

### 11.1.1.2 Fuentes móviles

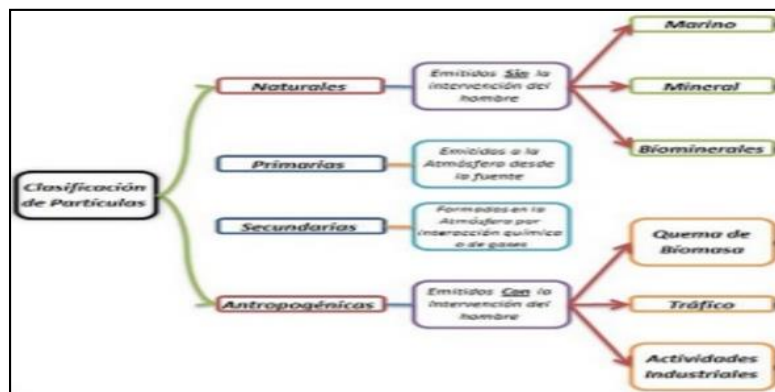
Ejemplos de fuentes móviles son los aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, tractocamiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, embarcaciones, equipo y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que por su operación generen o puedan generar emisiones contaminantes a la atmósfera. Si bien la definición de fuente móvil incluye prácticamente a todos los vehículos automotores, la NOM para fuentes fijas se refiere básicamente a las emisiones de automóviles y camiones. Los motores de los vehículos son los responsables de las emisiones de CO, de compuestos orgánicos volátiles, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>, producidos durante la combustión.

## 11.2 PARTICULAS EN SUSPENSIÓN

Según Pérez et al., (2010), las partículas en suspensión son cualquier sustancia que pueden estar presentes en estado sólido o líquido en la atmósfera y tiene tamaño microscópico, además pueden ser de origen natural o antropogénico (figura 5). El análisis de las partículas en suspensión se basa en el diámetro de las mismas, los cuales se pueden clasificar en:

- Partículas Suspendidas Totales (PST): diámetro hasta 100 micrómetros.
- Inhalables o respirables (PM<sub>10</sub>): diámetro menor a 10 micrómetros.
- Finas (PM<sub>2.5</sub>): diámetro menor a 2.5 micrómetros.
- Ultrafinas (PM<sub>1</sub>): diámetro menor a 1 micrómetro.

**Figura 5** Tipos de material particulado

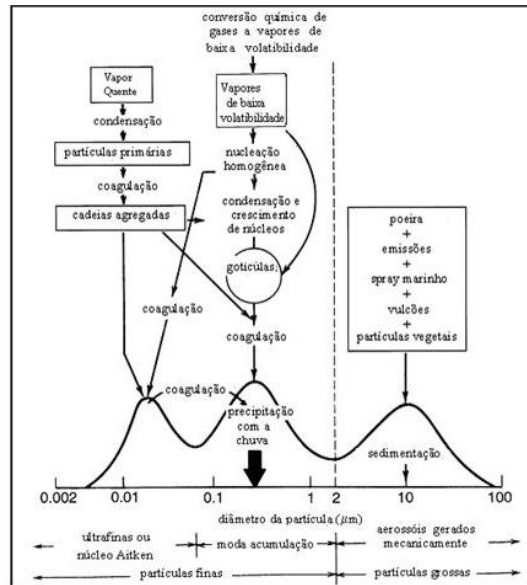


Fuente: UPTC

### 11.2.1 Material Particulado (PM<sub>10</sub>)

El material particulado (PM) es una compleja mezcla de partículas suspendidas en el aire las que varían en tamaño y composición dependiendo de sus fuentes de emisiones. La agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) y otras agencias alrededor del mundo regulan el nivel de partículas en el ambiente de un diámetro inferior a 10 micras (PM<sub>10</sub>) y también partículas inferiores a 2.5 micras de diámetro (PM<sub>2.5</sub>) (TALSA, 2003). En la figura 6 se presenta la distribución trimodal típica de las partículas atmosféricas.

**Figura 6** Distribución trimodal típica de las partículas atmosféricas



Fuente: Whitby y Cantrell (1976).

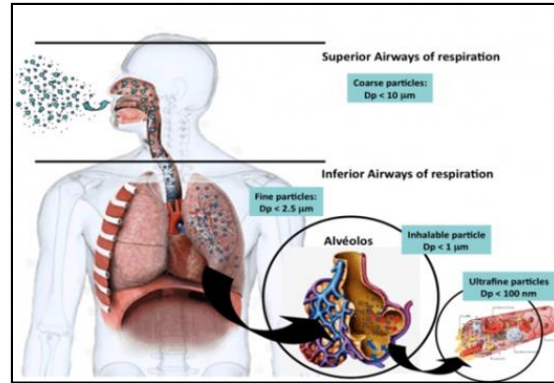
### 11.2.2 Fuentes de generación

Algunas partículas, conocidas como partículas primarias, son emitidas directamente por una fuente, por ejemplo, los automóviles, autobuses y camiones de carga, industrias, ciertos comercios, obras de construcción, vías sin pavimentar, chimeneas, humo de cigarrillo o incendios. Otras, nombradas partículas secundarias, son formadas por medio de complicadas reacciones en la atmósfera, a partir de otros químicos emitidos por plantas de generación de energía, industrias y automóviles. (Green, 2013).

### 11.2.3 Efectos sobre la salud y medio ambiente

La exposición prolongada o repetitiva a las PM<sub>10</sub> puede provocar efectos nocivos en el sistema respiratorio de la persona. No obstante, son menos perjudiciales que las PM<sub>2.5</sub>, ya que, al tener un mayor tamaño, no logran atravesar los alveolos pulmonares, quedando retenidas en la mucosa que recubre las vías respiratorias superiores (figura 7). La primera directiva de la calidad del aire, indica que para la protección de la salud no pueden superarse los 150 nanogramos por metro cúbico normalizado durante 24 horas. La mayoría de estas partículas precipitan en la tierra, provocando una capa de polvo en la superficie que puede afectar seriamente a la salud tanto de los organismos terrestres como los organismos acuáticos (PRTR, 2007).

**Figura 7** Material particulado en el cuerpo humano.



**Fuente:** Organización Mundial de la Salud.

El material particulado principalmente tendría afecciones en el cuerpo humano en:

- Origen de procesos inflamatorios
- Daño funcional en los pulmones
- Aumento en el riesgo de infarto cardíaco
- Efectos sistémicos en todo el organismo a través de la sangre
- Efectos cancerígenos y aumento de muertes súbitas

Los excesos en la mortalidad han sido asociados a la exposición de la salud humana a contaminantes particulados (Brunekreef y Holgate, 2002). En el caso de las partículas, las concentraciones más elevadas suelen encontrarse en las zonas urbanas de los países de ingresos bajos y medianos. Existe una gran relación entre la exposición a altas concentraciones de partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y el aumento de la mortalidad diaria y a largo plazo. Por lo contrario, cuando estas concentraciones son reducidas, la mortalidad también desciende, presentando una relación directamente proporcional (OMS, 2014). La contaminación con partículas conlleva efectos sanitarios incluso en muy bajas concentraciones; de hecho, no se ha podido identificar ningún umbral por debajo del cual no se hayan observado daños para la salud.



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO ( $PM_{10}$ ) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 11.2.4 Proceso y equipo de medición

En calidad de aire es fundamental la medición de la contaminación por partículas en suspensión determinando su concentración en sus diferentes fracciones: partículas suspendidas totales (PST), partículas menores de 10 micrómetros de diámetro aerodinámico ( $PM_{10}$ ) y partículas menores de 2.5 micrómetros de diámetro aerodinámico ( $PM_{2.5}$ ) (PMCA, 2008).

Existen diversos métodos que se agrupan de acuerdo a sus principios para la medición de contaminantes atmosféricos.

- Muestreo pasivo
- Muestreo con bioindicadores
- Muestreo activo
- Método automático
- Método óptico de percepción remota

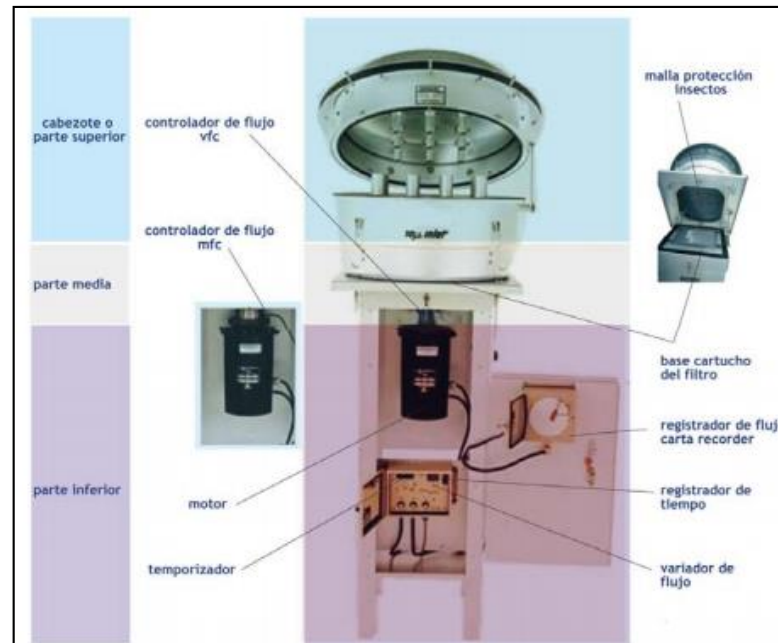
Es el método por el cual se determinan los componentes de una muestra, las concentraciones, y cualidades de cada uno de ellos. Los métodos para llevar a cabo mediciones utilizan muestreadores, siendo necesario analizar el contaminante por uno de los siguientes métodos:

- Métodos volumétricos
- Métodos gravimétricos
- Métodos fotométricos
- Espectrofotometría

#### 11.2.4.1 Muestreador Hi-Vol

Para la medición de las concentraciones del material particulado en suspensión, se pueden emplear equipos para la medición de partículas respirables o medidores de alto volumen  $PM_{10}$ , como el presentado en la figura 8. Estos equipos miden exclusivamente todo el material respirable establecido con tamaño de partícula menor que  $10\mu m$ ; las partículas respirables, son aquellas que logran pasar el tracto respiratorio penetrando en los alvéolos pulmonares (Saldarriaga, Echeverri & Molina, 2004).

**Figura 8** Partes del equipo muestreador Hi Vol



Fuente: MAVDT (2008)

El Hi-Vol es un muestreador de alto volumen que aspira aire del medio ambiente, a un flujo constante dentro de un orificio de forma especial en donde el material particulado en suspensión es separado inercialmente (Figura 8), en fracciones de uno a más, dentro de un rango menor a 10 micras. Pasadas 24 horas cada fracción es colectada en el filtro el material particulado PM<sub>10</sub> (CESEL, 2010)

Cabe precisar que el filtro es pesado, antes y después de su uso, con la finalidad de determinar la ganancia neta (masa) de PM<sub>10</sub> recolectado. El volumen del total del aire muestreado se debe corregir a condiciones normales de 25°C y 101,3 kPa, siendo determinado a partir del flujo medido y el tiempo de muestreo.

#### **11.2.4.2 Criterios para la ubicación de los equipos**

El Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (CFR 40), establece los criterios de representatividad para la localización de los sitios de muestreo de partículas suspendidas totales, de la siguiente forma:

- Altura de la toma de muestra sobre el piso: 2-15 m.



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



- Distancia al árbol más cercano: > 20 m de la circunferencia que marca el follaje o las raíces y por lo menos 10 m, si los árboles actúan como un obstáculo.
- La distancia del muestreador a obstáculos como edificios, debe ser mínimo, el doble de la altura en que sobresale el obstáculo sobre el muestreador. Se recomienda un radio libre de 10 m.
- El equipo debe tener un flujo de aire sin restricciones, 270° alrededor de la toma de muestra y/o un ángulo de 120° libre por encima del equipo.
- No podrá haber flujos de hornos o de incineración cercanos. Se recomienda 20 m de distancia del sitio de muestreo.
- La distancia a las carreteras/caminos debe ser de 2 a 10 m del borde a la línea de tráfico más cercana.

Además, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos para el sitio de muestreo:

- Fácil acceso, para visitas regulares de inspección, mantenimiento, calibración, etc.
- Seguridad contra vandalismo.
- Infraestructura: el sitio debe contar con energía eléctrica segura y teléfono.
- Libre de obstáculos que afecten el flujo de aire en las cercanías del muestreo (ejemplo: edificios, árboles, balcones, etc.).

### **11.3 METALES PESADOS**

Los metales pesados son sustancias propias de la naturaleza de peso molecular alto, muy difundidos y en muchos casos muy útiles, como, por ejemplo, el plomo que se utiliza mucho para tubería, y el cadmio. Respecto a la contaminación, los metales pesados tienen efectos en la salud y afectan diferentes órganos. (Eróstegui, 2009).

No todos los metales de densidad alta son especialmente tóxicos en concentraciones normales (algunos de ellos son necesarios para el ser humano). No obstante, hay una serie de metales pesados más conocidos por su tendencia a representar serios problemas medioambientales el mercurio (Hg), el plomo (Pb), el cadmio (Cd) y el talio (Tl), así como el cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr). En



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



ocasiones se incluye al hablar de contaminación por metales pesados a otros elementos tóxicos ligeros como el berilio (Be) o el aluminio (Al), o algún semimetal como el arsénico (As). La peligrosidad de los metales pesados reside en que no pueden ser degradados (ni química, ni biológicamente) y, además, tienden a bioacumularse y a biomagnificarse (que significa que se acumulan en los organismos vivos alcanzando concentraciones mayores que la que alcanzan en los alimentos o medioambiente, y que estas concentraciones aumentan a medida que ascendemos en la cadena trófica), provocando efectos tóxicos de muy diverso carácter. En el ser humano se han detectado infinidad de efectos físicos (dolores crónicos, problemas sanguíneos, etc) y efectos psíquicos (ansiedad, pasividad, etc). (Ministerio de Agricultura y pesca, alimentación y medio ambiente de España).

- **Fuentes de emisión:** Hay que seguir el proceso natural, es decir donde están distribuidos y donde están concentrados. Entre las principales fuentes emisoras de metales pesados se encuentran las grandes instalaciones de combustión, transporte, cementeras y las instalaciones de incineración y coincineración de residuos. El más importante por su abundancia es el plomo que está presente en las cañerías de plomo, que actualmente ya no se usan y han sido reemplazadas por las plásticas. Otra fuente es la pintura de plomo que se usa en las artesanías, especialmente en utensilios de cocina, entonces, al momento de comer, se desprende el plomo de la pintura y se introduce al organismo.

- **Efectos sobre la salud humana:** Cada metal y cada elemento químico contaminante tienen un mecanismo de acción y un lugar de acumulación preferido. El más conocido es el plomo que afecta varios sistemas, por ejemplo, en el sistema nervioso llega a dañar a las neuronas especialmente las del cerebro. Otro metal pesado es el cadmio que también afecta al riñón. Los daños en si son muy diversos dependiendo de cada metal, pero en general se puede decir que hay lesión celular. En cuanto al riñón, los metales pesados a la larga van a producir daño renal que puede llegar hasta una insuficiencia renal.

- **Efectos sobre el medio ambiente:** Son bastantes graves y hablando específicamente, cambia la alcalinidad del suelo, obviamente, depende mucho de la concentración. También contaminan el agua y los cultivos. A nivel de los ríos y lagos, también afecta principalmente la fauna.

- **Normativa:** En cuanto a normativa cabe destacar el Protocolo de Aarhus (Dinamarca) sobre contaminación atmosférica transfronteriza a gran distancia en materia de metales pesados, que deriva del Convenio de Ginebra sobre contaminación transfronteriza a larga distancia de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE).



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



### 11.3.2 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA)

Es una técnica utilizada para determinar la concentración de elementos metálicos en una muestra. Es la principal técnica usada para este fin y puede utilizarse para analizar la concentración de más de 62 metales diferentes en una solución. Los electrones de los átomos absorben una cantidad de energía (luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía se refiere específicamente a una transición de electrones en un elemento particular correspondiendo cada longitud de onda a un elemento en específico.

Al ser la cantidad de energía en la llama es conocida, y la cantidad restante en el otro lado medible, de esta manera es posible, a partir de la ley de Beer-Lambert, determinar una señal que es proporcional a la concentración del elemento que se mide.

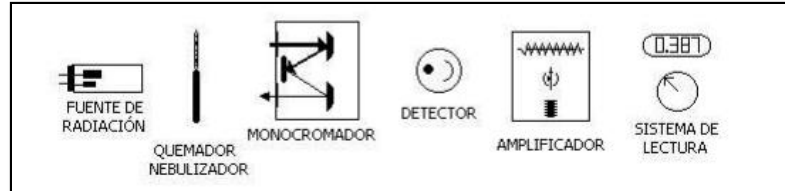
Una muestra de líquido normalmente se convierte en gas atómico en tres pasos:

- 1. Desolvación:** El líquido disolvente se evapora, y la muestra permanece seca.
- 2. Vaporización:** La muestra sólida se evapora a gas.
- 3. Atomización:** Los compuestos que componen la muestra se dividen en átomos libres.

La espectrometría de absorción atómica (EAA), tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos, está determinada por la ley de Beer, que relaciona ésta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbentes. Los componentes instrumentales de un equipo de espectrofotometría de absorción atómica son los similares a los de un fotómetro o espectrofotómetro de flama, excepto que en EAA se requiere de una fuente de radiación necesaria para excitar los átomos del analito.

Los componentes de un espectrofotómetro de absorción atómica se representan en la figura 9.

**Figura 9** Componentes de un espectrofotómetro de absorción atómica



Fuente: ROCHA (2000)

## 11.4 INDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA)

En Colombia el Índice de Calidad del Aire ha sido adoptado a partir del documento EPA-454/B-09-001 de febrero de 2009, la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA) tiene seis categorías para clasificar la calidad del aire y el riesgo al que se encuentra expuesta la población, con base en el valor del índice de calidad del aire. Cada una de estas categorías se encuentra identificada con un color, el cual representa el riesgo de la concentración de los contaminantes presentes en el aire para la salud. La tabla 5 muestra la clasificación y el color al que corresponde de acuerdo con el intervalo del Índice de Calidad del Aire:

**Tabla 5** Clasificación del Índice de la Calidad del Aire de acuerdo con el intervalo

ICA	Color	Clasificación
0-50	Verde	Buena
51-100	Amarillo	Moderada
101-150	Naranja	Dañina a la salud para grupos sensibles
151-200	Rojo	Dañina a la salud
201-300	Púrpura	Muy dañina a la salud
301-500	Marrón	Peligrosa

Fuente: EPA (2012), MADS (2010)

De acuerdo con el resultado obtenido al calcular el Índice de Calidad del Aire (ICA), se clasifica en una de las categorías mostradas en la tabla 5 para cada contaminante existen acciones preventivas a tomar para evitar la afectación a la salud de la población (IDEAM, 2012)



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



El ICA será calculado a partir de la ecuación 1, que corresponde a la metodología utilizada por la US-EPA para el cálculo del AQI y será reportado el mayor valor que se obtenga de las diferentes ecuaciones individuales. (MAVDT, 2008)

$$I_p = \frac{I_{Hi} - I_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{Lo} \quad \text{Ec (1)}$$

Dónde:  $I_p$  = Índice para el contaminante p.

$C_p$  = Concentración medida para el contaminante p.

$BP_{Hi}$  = Punto de corte mayor o igual a  $C_p$ .

$BP_{Lo}$  = Punto de corte menor o igual a  $C_p$ .

$I_{Hi}$  = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al  $BP_{Hi}$ .

$I_{Lo}$  = Valor del Índice de Calidad del Aire correspondiente al  $BP_{Lo}$ .



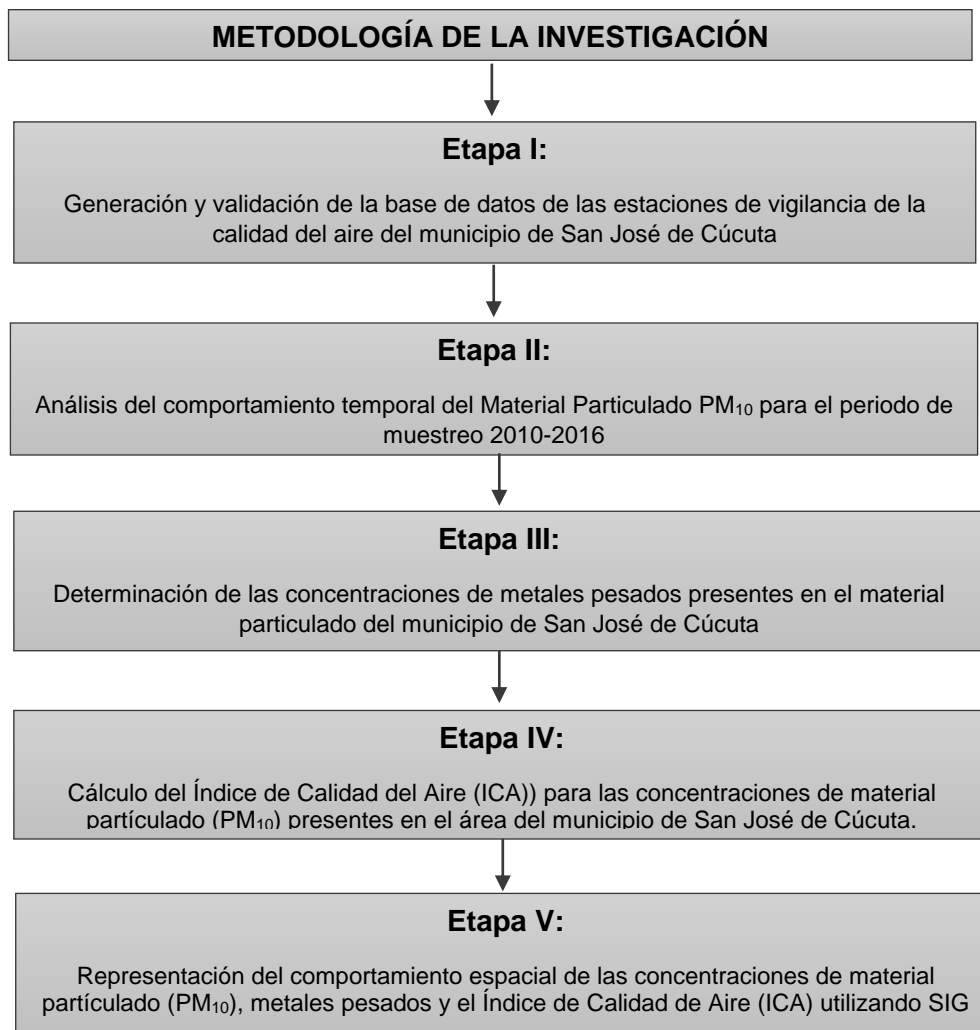
**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## 12. METODOLOGÍA

En la figura 10 se presenta el diagrama de flujo de las etapas para el desarrollo de la presente investigación.

**Figura 10** Metodología de la investigación.

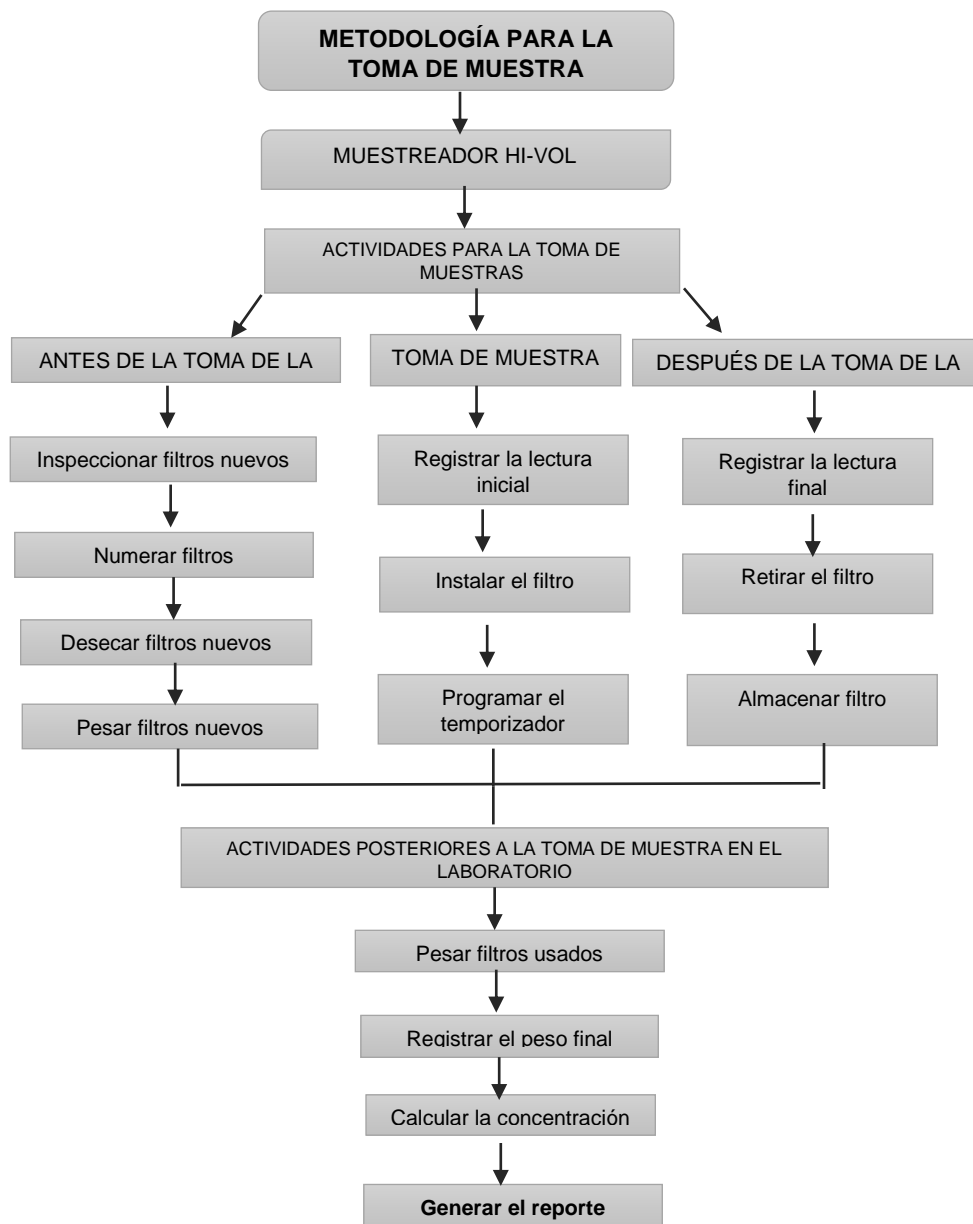


**Fuente:** Trujillo, J (2017).

## 12.1 GENERACIÓN Y VALIDACIÓN BASE DE DATOS

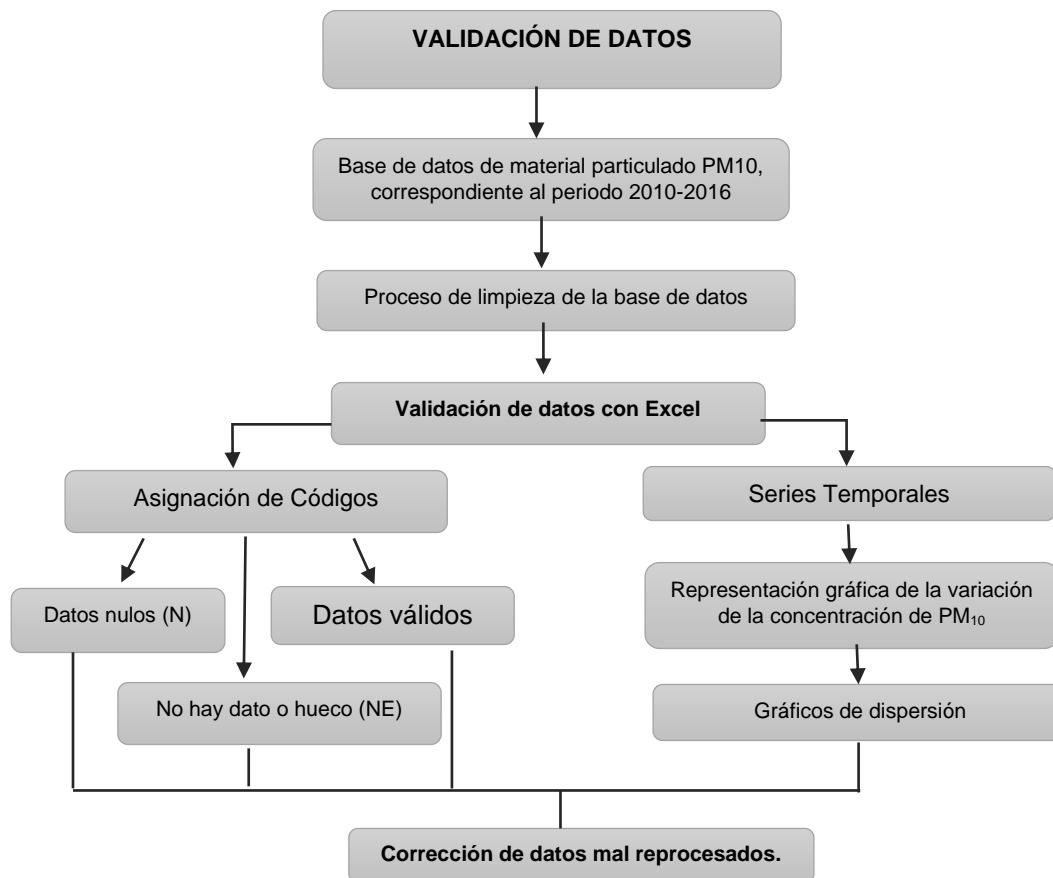
Las figuras 11 y 12 representan la metodología a seguir para los procesos de generación y validación de la base de datos de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, registrados en las estaciones de la red de calidad del aire de CORPONOR.

**Figura 11** Metodología para la toma de muestra



Fuente: Trujillo, J (2017).

**Figura 12** Proceso de validación de la base de datos



Fuente: Trujillo, J (2017).

En primer lugar, se recopiló la información correspondiente a los valores de material particulado PM<sub>10</sub>, registrados en las tres estaciones (Cinera, Sena y Panamericano) que están bajo la autoridad de la subdirección de desarrollo sectorial sostenible de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR), para el periodo 2010-2016. De igual manera, se compiló información meteorológica registrada por la estación camilo daza (Aeropuerto Camilo Daza) para el mismo periodo, suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Finalmente se obtiene la base de datos de calidad del aire y la base de datos de las variables meteorológicas a analizar, para el periodo de estudio (2010-2016) en el municipio de San José de Cúcuta. (Ver Figura 12).

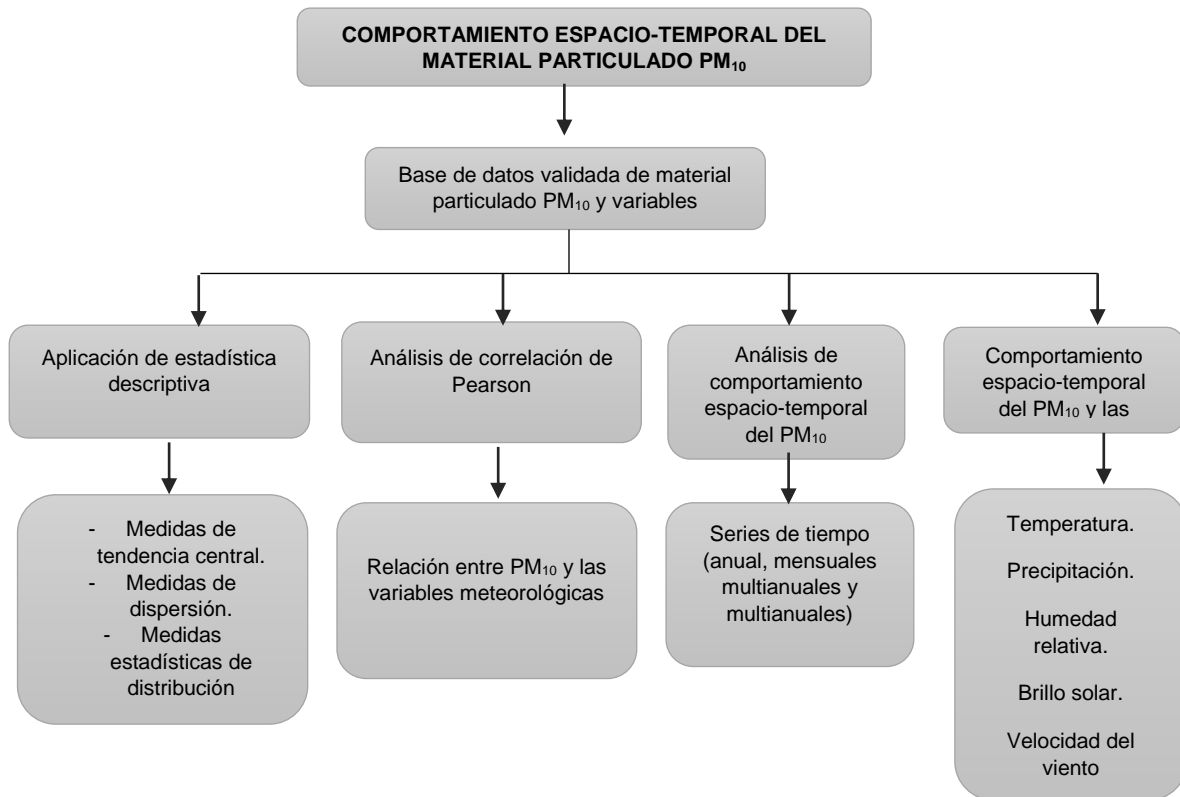


## 12.2 COMPORTAMIENTO ESPACIO- TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>)

A partir de la base de datos validada de material particulado PM<sub>10</sub> y variables meteorológicas, se realiza un análisis estadístico descriptivo y se determina la correlación existente entre estas variables, en el periodo de muestreo 2010-2016 para el municipio de San José de Cúcuta. Posteriormente se analiza la variación temporal (valores mensuales y anuales) del material particulado (PM<sub>10</sub>) registrado desde el año 2010 hasta 2016 en las estaciones de monitoreo de calidad del aire del municipio. Por último, se realizan comparaciones entre el comportamiento temporal del material particulado (PM<sub>10</sub>) y los parámetros meteorológicos que más se correlacionan entre sí, e influyen en su generación, reactividad y transporte.

En la figura 13 se resume la metodología a seguir para el análisis del comportamiento espacio-temporal del material particulado PM<sub>10</sub> en las estaciones de muestreo.

**Figura 13** Metodología para el análisis del comportamiento espacio-temporal del material particulado PM<sub>10</sub>



Fuente: Trujillo, J (2017).



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 12.3 ESTIMACIÓN DE METALES PESADOS

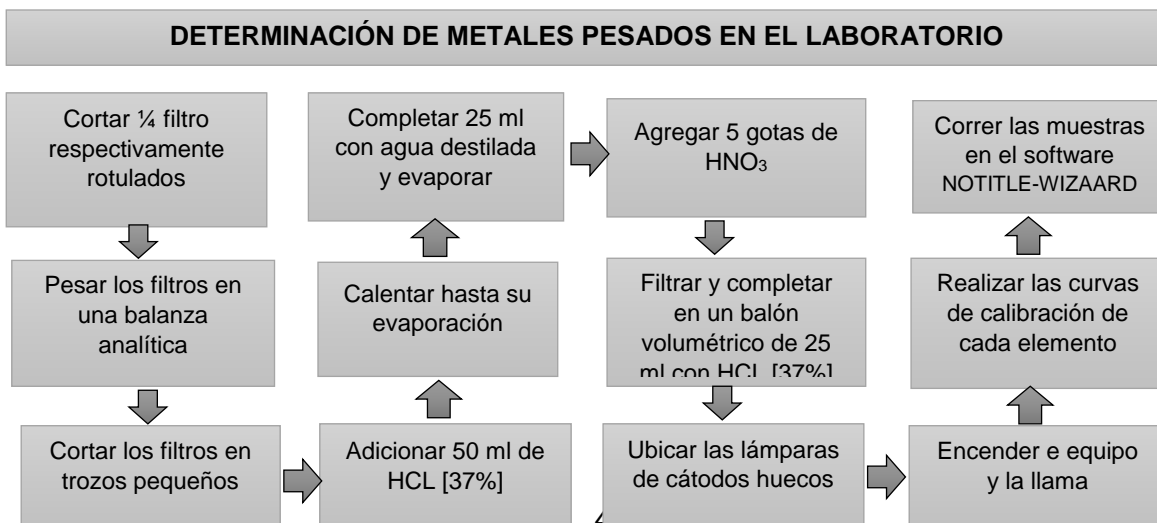
#### 12.3.1 Muestreo

Para la determinación de las zonas de muestreo se tiene en cuenta las estaciones de calidad del aire de CORPONOR ubicadas en el municipio de San José de Cúcuta, además de diversos factores como tráfico automotor y densidad demográfica, siendo muy relevante la determinación de la zona de referencia en la cual se realizará la comparación con las zonas de emisión y dispersión. Luego se solicitan a CORPONOR los filtros de material particulado PM<sub>10</sub> de las estaciones Cínera, Panamericana y Sena. El equipo Hi-Vol atrapa el aire en uno filtros que posteriormente se extraen y se miden las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>.

#### 12.3.2 Detección y análisis de metales

Para la detección y el análisis de los metales recolectados en las muestras de material particulado de Cúcuta se utiliza el espectrofotómetro de absorción atómica AA-7000 Shimadzu, ubicado en el laboratorio de Control y Calidad de la Universidad de Pamplona, basado en la metodología EN-5 análisis de metales en aire contaminado. Se prepara una digestión del filtro cortado durante 30 minutos en 100 ml de HCl a fuego lento. Posteriormente se re disuelve después de extraer los sólidos en 10 ml de HCl y 10 gotas de HNO<sub>3</sub>. Se filtra la solución a través de un papel filtro de cinta azul S&S #589 y aspirar a la llama. Se corre inicialmente un filtro blanco junto con las muestras para corregir el material extraído de los filtros de vidrio. Por último, se determina la concentración del metal analizado utilizando el procedimiento de rutina y la respectiva curva de calibración. En la figura 14 se resume la metodología a emplear para la detección de metales pesados por medio de la EAA.

Figura 14 Metodología para la determinación de metales pesados en el laboratorio





## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 12.4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA)

El índice de Calidad del Aire (ICA) permite comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de las autoridades ambientales o entidades, que cuenten con un Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. El ICA corresponde a una escala numérica a la cual se le asigna un color, el cual a su vez tiene una relación con los efectos a la salud. El ICA corresponde a un valor adimensional, que oscila entre 0-500.

Para la determinación del Índice de Calidad de Aire (ICA) se emplea la ecuación 1 descrita en el apartado 11.4, que corresponde a la metodología utilizada por la US-EPA. Se calcula el ICA para los valores anuales de material particulado PM<sub>10</sub> registrado en las estaciones de muestreo de calidad del aire del municipio de Cúcuta.

### 12.5 REPRESENTACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

La representación cartográfica del material particulado, el índice de calidad del aire y los metales pesados, permite identificar áreas-fuentes, donde la contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> es crítica y donde se pueden presentar focos de contaminación que, a su vez, pueden incidir en la salud de los habitantes del municipio.

#### 12.5.1 Concentraciones de material particulado (PM<sub>10</sub>)

En esta etapa se realiza el tratamiento a los valores mensuales multianuales e interanuales de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, con la aplicación de Sistemas de Información Geográfica (ArcGis), con el fin de representar el comportamiento espacial de las concentraciones de PM<sub>10</sub> en el área de estudio.

#### 12.5.2 Concentraciones de metales pesados

Se representará espacialmente las concentraciones de metales pesados presentes en el material particulado PM<sub>10</sub>, indicando las áreas en las cuales la concentración es más crítica.



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



### **12.5.3 Índice de Calidad de Aire (ICA)**

Luego de calcular el ICA, se procederá a representar espacialmente la clasificación de este de acuerdo a los valores anuales de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>; con el fin de establecer las zonas donde la contaminación por PM<sub>10</sub> es buena, moderada, dañina, muy dañina o peligrosa para la salud de los habitantes del municipio.



## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 13. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El municipio de San José de Cúcuta se caracteriza por presentar diversas fuentes generadoras de material particulado PM<sub>10</sub> como son las chimeneas de las ladrilleras, cementeras, alto flujo vehicular, obras civiles, comercio fronterizo, entre otros. Para la discusión de resultados se presentan las tres estaciones de monitoreo de calidad de aire de acuerdo a la fuente potencial antropogénica de la zona de estudio y sus alrededores.

- **Estación Cinera:** Se caracteriza en función de la quema de combustibles fósiles, principalmente por el flujo vehicular.
- **Estación Sena:** Se caracteriza por la generación de partículas de origen residencial, industrial y flujo vehicular en los alrededores.
- **Estación Panamericana:** Se caracteriza en función de la generación de residuos sólidos urbanos, teniendo en cuenta el tránsito de aviones que entran y salen del aeropuerto Camilo Daza cercano a esta estación.

#### 13.1 GENERACIÓN Y VALIDACIÓN BASE DE DATOS

En el anexo I se presentan las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, correspondientes a las estaciones Cinera, Sena y Panamericana, para el periodo 2010-2016; cabe aclarar que los datos no tienen un periodo de toma de muestra continuo, es decir, los datos no fueron tomados diariamente. De igual manera, en el anexo II se aprecian los datos meteorológicos para el periodo en análisis (2010-2016), que caracterizan la zona de estudio e indican comportamientos puntuales respecto a las concentraciones de PM<sub>10</sub> para el municipio de San José de Cúcuta, Norte de Santander.

Para dar continuidad a la investigación, se determina el número de muestras que se registran durante cada año, para el periodo de muestreo 2010- 2016. La figura 15 representa el número mínimo de muestras validas anuales según el manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (2010), el cual indica que se deben tomar 7 muestras mínimas mensuales, puesto que el equipo de medición es de tipo manual; por tanto, anualmente se deben registrar 84 muestras, como mínimo. Al realizar la comparación con el número total de muestras obtenidas

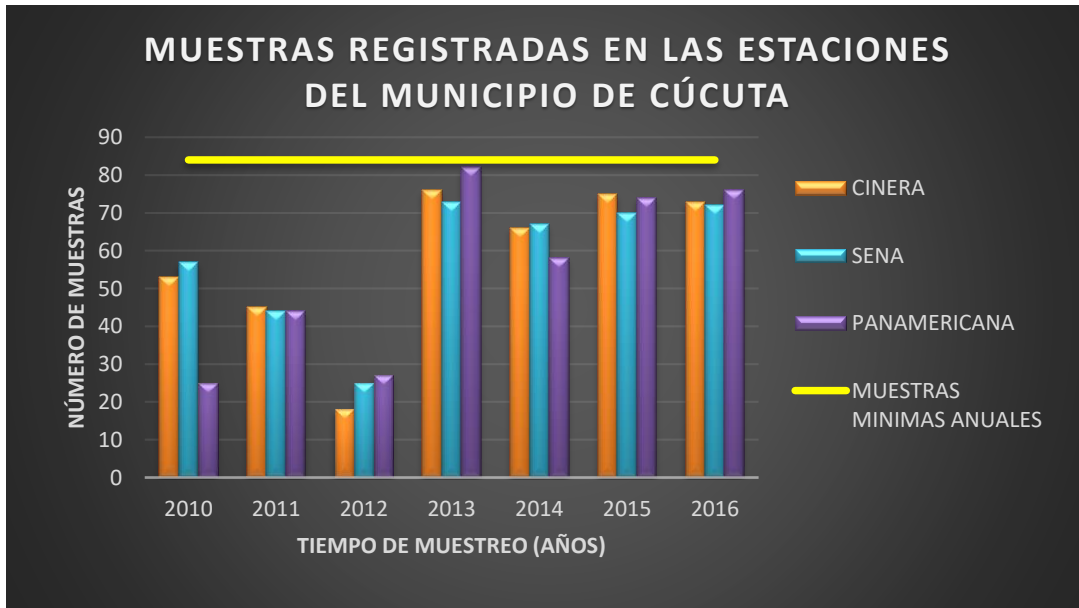


**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



para cada año de muestreo en las tres estaciones de calidad del aire, se obtiene lo siguiente:

**Figura 15** Control de la toma de muestra (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017).

De acuerdo a lo observado en la figura 15, en el año 2013 se registró la mayor cantidad de muestras en las tres estaciones de monitoreo; el número de muestras registradas para este año están cercanas al mínimo valor anual que se plantea en el manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, indicando que son muestras de referencia para posteriores análisis, en comparación con los demás años de muestreo.

Respecto al año 2011, se observa la poca variación en el número de muestras registradas por las tres estaciones de monitoreo. Sin embargo, la cantidad de muestras registradas en este año es aproximadamente la mitad de las muestras mínimas anuales (50 % de significancia de las muestras). Por otra parte, el número de muestras registradas en el 2012 presentan la mayor discrepancia respecto al número de muestras mínimas anuales, lo que indica que no son significativas para los posteriores análisis a realizar, por la escasez de muestras.

En la tabla 6 se resume la estadística descriptiva aplicada a la base de datos de material particulado PM<sub>10</sub>, correspondiente al periodo 2010-2016 para las estaciones Cinera, Sena y Panamericano. Así mismo, se presenta el análisis estadístico a las variables meteorológicas de la estación Climatológica Ordinaria Camilo Daza.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Tabla 6.** Estadística descriptiva de PM<sub>10</sub> y variables meteorológicas.

Parámetro	Cinera (µg/m <sup>3</sup> )	Sena (µg/m <sup>3</sup> )	Panamericano (µg/m <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Humedad Relativa (%)	Brillo Solar (horas)	Evaporación (mm)	Velocidad del Viento (m/s)
N	257	272	236	2064	2068	2066	2032	1942	1767
Valor máximo	95.05	154.6	132.2	32.3	168.4	96	11.8	19	8.8
Valor mínimo	3	16.9	13.9	21.5	0	37	0	0	0.4
Valor medio	52.864	70.061	73.061	27.383	2.708	69.643	5.879	5.902	2.668
Desviación Estándar	17.582	18.836	17.765	1.816	9.247	11.578	2.920	2.459	1.364
Varianza	309.143	354.788	315.592	3.297	85.511	134.050	8.528	6.046	1.861
Coef. Variación	0.333	0.269	0.243	0.066	3.415	0.166	0.497	0.417	0.511
Asimetría	-0.446	1.663	0.565	-0.087	7.750	-0.323	-0.287	0.604	1.250
Curtosis	0.258	5.486	2.103	-0.340	86.876	-0.720	-0.870	0.725	0.866

Fuente: Trujillo, J (2017).

Como se mencionó anteriormente, los datos de material particulado PM<sub>10</sub> no fueron tomados en los mismos días en algunos casos. Por consiguiente, el total de datos de cada una de las estaciones varían para el contaminante, según se observa en la tabla 6. El mayor episodio de contaminación por PM<sub>10</sub> se presentó en la estación SENA el 22 de abril de 2010 alcanzando una concentración de 154.6 µg/m<sup>3</sup>. Además, se observó que los días previos a este episodio se registraron valores cercanos, no obstante, el episodio no alcanza el estado excepcional mínimo de prevención según la resolución 610 de 2010.

### 13.2 COMPORTAMIENTO ESPACIO- TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>)

A continuación, se presentan los resultados referentes al comportamiento temporal del material particulado PM<sub>10</sub> registrado en las tres estaciones de muestreo, para el periodo 2010-2016.

En la figura 16 se presenta el comportamiento temporal multianual de las concentraciones de PM<sub>10</sub> para las tres estaciones en análisis. Se observa que en el año 2011 se registran las mayores concentraciones anuales de PM<sub>10</sub>, en las estaciones Sena y Panamericana; en el caso de la estación Cinera, el valor máximo de concentración de PM<sub>10</sub> se presenta en el año 2016. Por otra parte, en el año 2012 se presenta una discrepancia entre las concentraciones de las estaciones



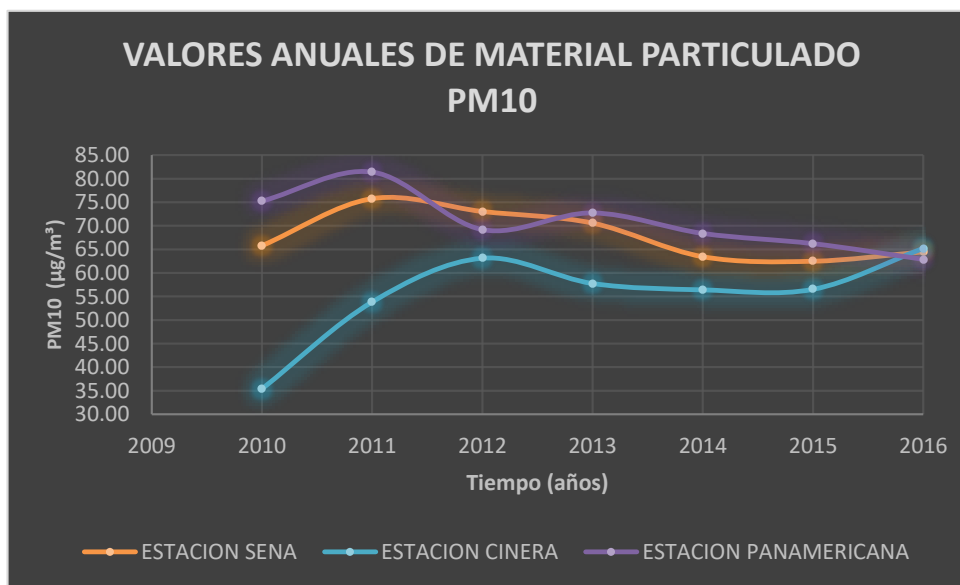
## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Panamericana y Sena respecto a la estación Cinera, en la que la concentración aumenta; esto se debe a la poca significancia de los valores registrados en este año, pues es el año de muestreo que presenta menor cantidad de datos, de acuerdo a lo referenciado en la figura 15. En los años 2013, 2014 y 2015, el comportamiento de las concentraciones de PM<sub>10</sub> es similar, con tendencia a disminuir.

Respecto al aumento de las concentraciones de PM<sub>10</sub> a lo largo de los años, es importante evidenciar el aumento de los procesos industriales en el municipio de San José de Cúcuta, principalmente por las chimeneas de las ladrilleras presentes en los alrededores y el incremento de la quema de combustibles fósiles por el flujo vehicular y, a su vez, el aumento desproporcionado de la población.

**Figura 16** Valores anuales de Material Particulado PM<sub>10</sub> (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017).

En la tabla 7 se observan los valores máximos permisibles de material particulado PM<sub>10</sub>, establecidos por la normativa internacional (Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, por sus siglas en inglés US EPA) y la normativa nacional (Resolución 610 de 2010) y, a su vez, los valores anuales de PM<sub>10</sub> registrados por las tres estaciones de monitoreo de calidad del aire del municipio de San José de Cúcuta.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Tabla 7** Cumplimiento del límite anual PM<sub>10</sub> del monitoreo 2010-2016

AÑO	ESTACIÓN			LIMITE ANUAL PM10		
	CINERA	SENA	PANAMERICA	OMS	EPA	Resolución 610 de 2010
2010	65.77	35.40	75.24	20	50	50
2011	75.76	53.86	81.42			
2012	73.03	63.15	69.18			
2013	70.57	57.78	72.73			
2014	63.44	56.43	68.37			
2015	62.48	56.54	66.20			
2015	64.45	65.23	62.87			

Fuente: Trujillo, J (2017).

En la figura 17 se presenta la comparación entre los valores anuales de material particulado PM<sub>10</sub> y los límites anuales permisibles establecidos por la normativa. Como se observa, en ninguna de las estaciones de monitoreo se cumple el límite anual permisible de PM<sub>10</sub> (20 µg/m<sup>3</sup>) estipulado por la OMS, la cual es exigente, debido a los efectos a la salud que se pueden presentar por una exposición prolongada al contaminante. Por otra parte, los valores registrados por las tres estaciones no cumplen con la normativa colombiana y la EPA, presentándose en su mayoría, valores por encima de 50 µg/m<sup>3</sup>. No obstante, en la estación Cinera se presentan concentraciones de PM<sub>10</sub> cercanas a las establecidas por la Resolución 610 de 2010 y la EPA, resaltando la registrada en el 2010 (35,4 µg/m<sup>3</sup>).

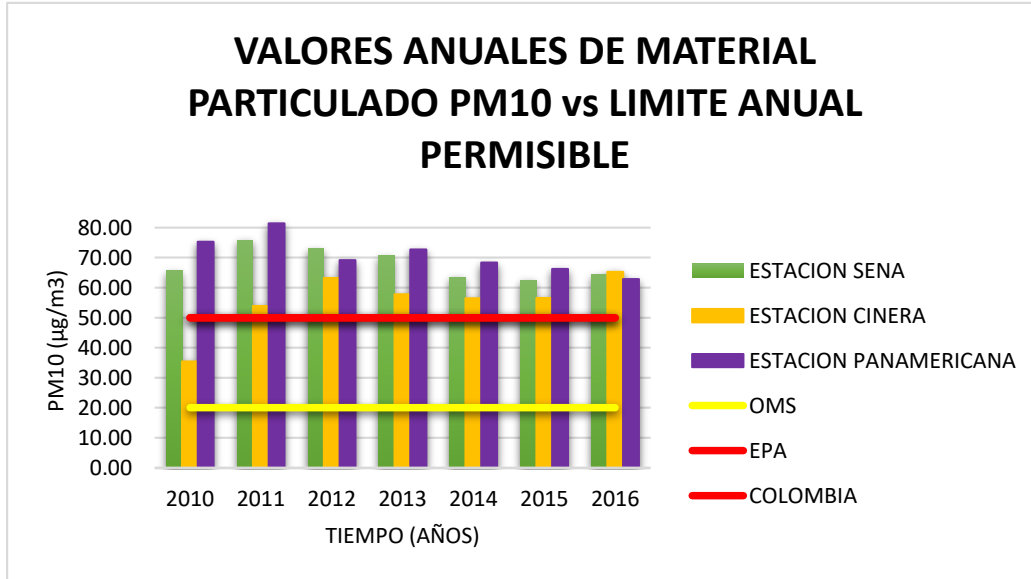
Lo anterior indica que a lo largo de los años de monitoreo se han presentado episodios o eventos por altas concentraciones de este contaminante, que, a corto plazo, puede causar efectos adversos a la salud humana, sobretodo al sistema respiratorio, tanto en cercanías a las estaciones de muestreo como en todo el municipio.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



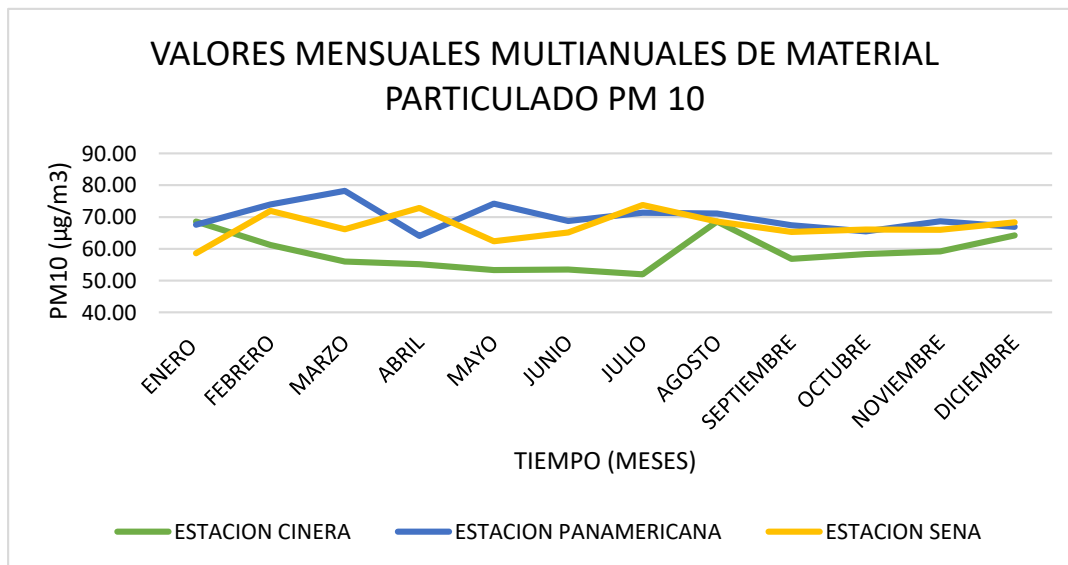
**Figura 17** Valores anuales de Material Particulado PM<sub>10</sub> (2010-2016) vs Limite anual permisible.



Fuente: Trujillo, J (2017).

El comportamiento mensual multianual de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> para los años 2010-2016 se presenta en la figura 18.

**Figura 18** Comportamiento mensual multianual de material particulado (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Se observa un aumento del material particulado para los meses de febrero, marzo, mayo, julio y agosto, principalmente en las estaciones Sena y Panamericana, las cuales están ubicadas en áreas industriales; mientras que en los meses enero, abril, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre se observa una disminución en las concentraciones, indicando que son transportadas y depositadas en lugares lejanos del municipio. La estación Cinera, que se ubica principalmente en el centro del municipio registra los valores mensuales más bajos, en comparación con Sena y Panamericana; sin embargo, para el mes de agosto se registró un valor relativamente alto, debido a la influencia de variables meteorológicas como velocidad del viento, que arrastran las partículas y las depositan en zonas residenciales, induciendo a posibles focos de contaminación.

En la tabla 8 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson determinado para las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> de la estación Cinera y las variables meteorológicas registradas por la estación Camilo Daza.

**Tabla 8** Coeficiente de correlación para PM<sub>10</sub>-Estación Cinera y variables meteorológicas

	<i>PM10 Cinera (µg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Brillo solar (horas)</i>	<i>Evaporación (mm)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>
<b>PM10 Cinera (µg/m<sup>3</sup>)</b>	1						
<b>Brillo solar (horas)</b>	-0.113	1					
<b>Evaporación (mm)</b>	-0.190	0.578	1				
<b>Humedad relativa (%)</b>	0.193	-0.563	-0.722	1			
<b>Precipitación (mm)</b>	0.056	-0.208	-0.043	0.281	1		
<b>Temperatura (°C)</b>	-0.261	0.634	0.697	-0.891	-0.236	1	
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	-0.152	0.347	0.629	-0.826	-0.183	0.676	1

Fuente: Trujillo, J (2017)

Las variables meteorológicas brillo solar, evaporación, temperatura y velocidad del viento presentan una relación inversa con el material particulado PM<sub>10</sub> en la estación Cinera, por otra parte, la humedad relativa y la precipitación presentan relación directa. No obstante, todas las variables presentan una relación muy baja, lo cual indica que no influyen en gran medida con el comportamiento del contaminante en estudio.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



En la tabla 9 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson determinado para las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> de la estación Sena y las variables meteorológicas registradas por la estación Camilo Daza.

**Tabla 9** Coeficiente de correlación para PM<sub>10</sub>-Estación Sena y variables meteorológicas

	<i>PM10 Sena (µg/m³)</i>	<i>Brillo solar (horas)</i>	<i>Evaporación (mm)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>
<b>PM10 Sena (µg/m³)</b>	1						
<b>Brillo solar (horas)</b>	-0.066	1					
<b>Evaporación (mm)</b>	-0.027	0.511	1				
<b>Humedad relativa (%)</b>	0.052	-0.501	-0.632	1			
<b>Precipitación (mm)</b>	0.015	-0.101	-0.100	0.233	1		
<b>Temperatura (°C)</b>	-0.062	0.596	0.600	-0.872	-0.201	1	
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	-0.018	0.242	0.585	-0.817	-0.155	0.625	1

Fuente: Trujillo, J (2017)

En la tabla 10 se muestra el coeficiente de correlación de Pearson determinado para las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> de la estación Panamericana y las variables meteorológicas registradas por la estación Camilo Daza.

Así mismo, en la estación Sena y Panamericana se presenta relación inversa con las variables brillo solar, evaporación, temperatura y velocidad del viento; y relación directa con la humedad relativa y la precipitación. Es imperativo aclarar que no presentan una correlación relevante, en por esto que se puede mencionar que las variables meteorológicas no presentaron mayor influencia en el comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> en ninguna de las 3 estaciones de la Red de Calidad de Aire de CORPONOR.

Por otra parte, la estación Panamericana es la que se encuentra ubicada más cerca a la estación meteorológica Camilo Daza siendo esta la de mayor relevancia en el comportamiento directo de las variables con respecto al contaminante en estudio. Aun así, los datos de concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> de la estación Panamericana no presentan influencia con las variables meteorológicas.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Tabla 10** Coeficiente de correlación para PM10-Estación Panamericana y variables meteorológicas

	<i>PM10 Panamericana (µg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Brillo solar (horas)</i>	<i>Evaporación (mm)</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	<i>Precipitación (mm)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Velocidad del viento (m/s)</i>
<b>PM10 Panamericana (µg/m<sup>3</sup>)</b>	1						
<b>Brillo solar (horas)</b>	-0.021	1					
<b>Evaporación (mm)</b>	-0.050	0.513	1				
<b>Humedad relativa (%)</b>	0.079	-0.503	-0.657	1			
<b>Precipitación (mm)</b>	0.030	-0.160	0.133	0.224	1		
<b>Temperatura (°C)</b>	-0.071	0.651	0.653	-0.883	-0.210	1	
<b>Velocidad del viento (m/s)</b>	-0.095	0.299	0.582	-0.830	-0.151	0.661	1

Fuente: Trujillo, J (2017)

A continuación, se presenta gráficamente la relación entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y las variables meteorológicas registradas en la estación Camilo Daza, para el periodo 2010-2016 en el municipio de Cúcuta.

En la figura 19 se presenta el comportamiento mensual multianual de las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas en las tres estaciones en análisis y la temperatura. El comportamiento de la temperatura en la zona de estudio indica valores mensuales altos para los meses de julio, agosto y septiembre, presentándose mayor actividad fotoquímica durante el día, que hace reaccionar las partículas en la atmosfera, disminuyendo la concentración de PM<sub>10</sub> para estos meses y generando partículas más perjudiciales para la salud (sobretudo para el sistema respiratorio) de diámetro más fino (<2.5 µm), conocidas comúnmente como PM<sub>2.5</sub>. En los meses de febrero y diciembre se presentan bajas temperaturas, disminuyendo la actividad fotoquímica en la atmosfera, y, por ende, aumentando las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> en la zona de estudio

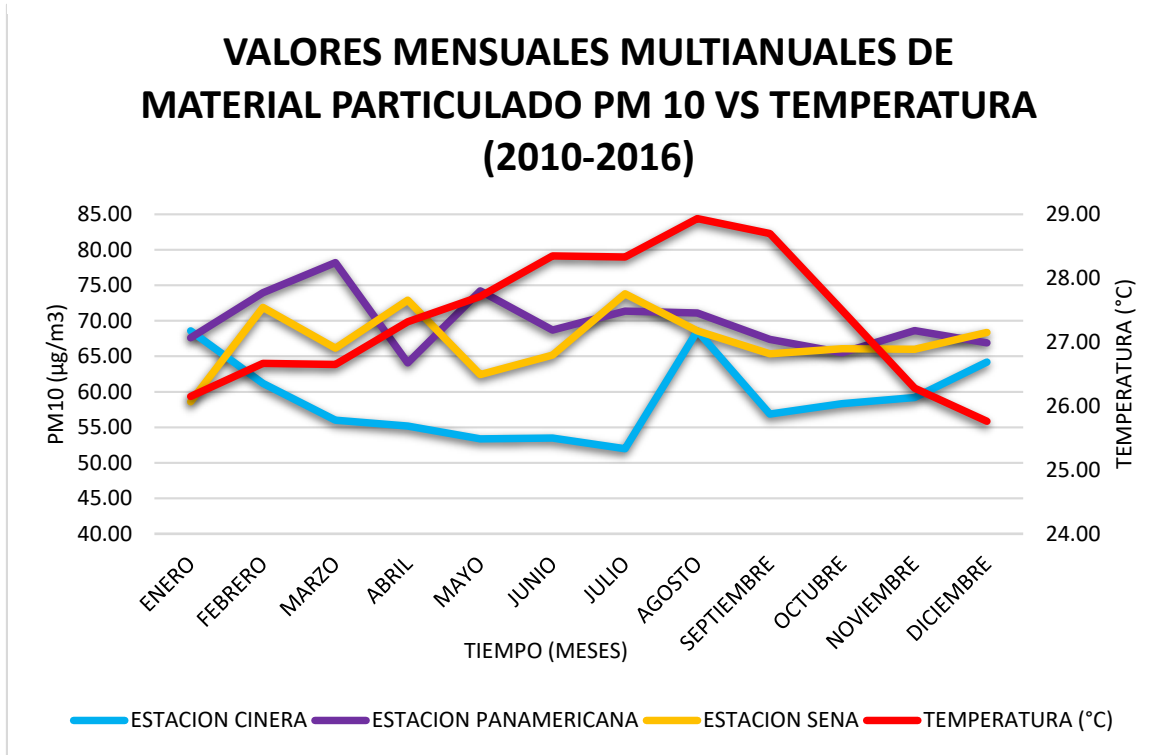
De acuerdo a lo anteriormente mencionado, y teniendo en cuenta los valores de PM<sub>10</sub> registrados por las tres estaciones de monitoreo, la relación entre el material particulado PM<sub>10</sub> y la temperatura es inversamente proporcional, es decir, a mayor temperatura menor concentración de PM<sub>10</sub>



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 19** Comportamiento temporal del material particulado PM<sub>10</sub> vs Temperatura (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

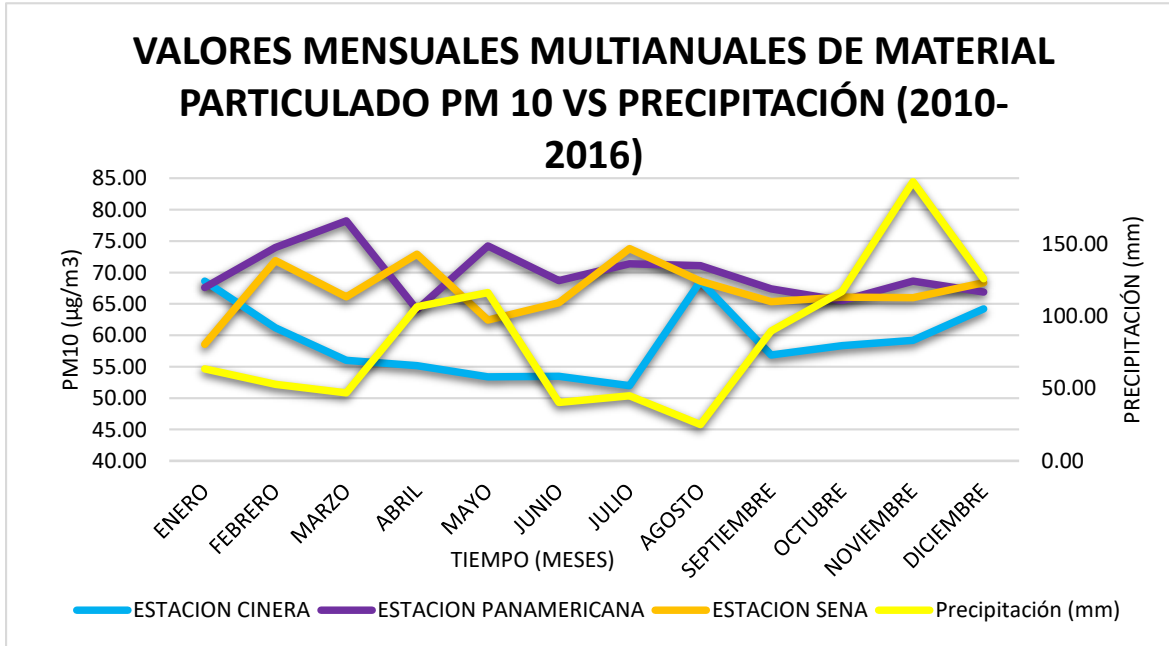
La figura 20 muestra el comportamiento mensual multianual de las concentraciones de PM<sub>10</sub> respecto a la precipitación registrada por la estación Camilo Daza. Como se observa, el comportamiento temporal de la precipitación tiene un carácter bimodal, con dos periodos de lluvia (en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre) y un periodo seco (junio-agosto), durante el año en el municipio de Cúcuta. En los periodos de lluvia las concentraciones de material particulado disminuyen, debido al arrastre de partículas a la superficie por la precipitación. Por otra parte, en el periodo seco se presentan concentraciones más altas de PM<sub>10</sub>, por la acumulación de partículas en la zona de estudio. Sin embargo, la relación entre el material particulado PM<sub>10</sub> y la precipitación no es tan fuerte, debido a que las lluvias, por lo general, se presentan en horas de la tarde, cuando ya han participado otras variables meteorológicas en la dispersión del material particulado PM<sub>10</sub>.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 20** Comportamiento temporal del material particulado PM10 vs Precipitación (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

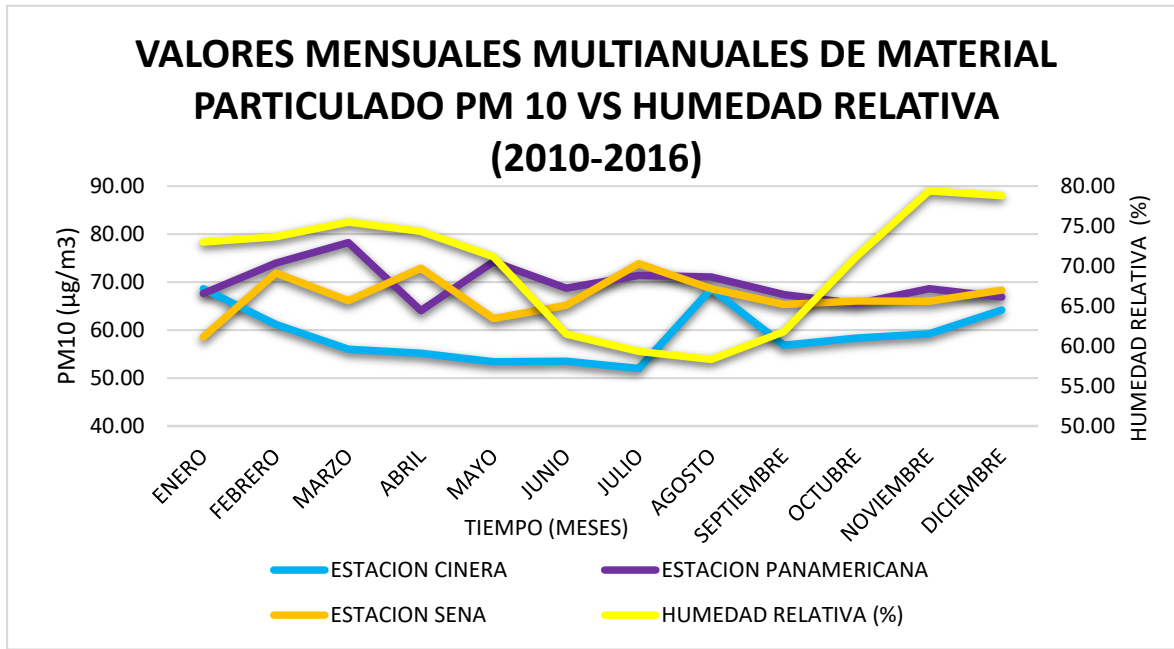
La figura 21 representa la comparación entre los valores mensuales multianuales de material particulado PM<sub>10</sub> humedad relativa, para el periodo 2010-2016. La humedad relativa depende de la temperatura, pues presentan una relación inversamente proporcional. Respecto al material particulado, se observa una relación inversa, es decir, a una alta humedad relativa las concentraciones de material particulado disminuyen. Al comparar el comportamiento de la humedad relativa con el de la temperatura (Figura 18) se observa la dependencia directa entre las dos variables y, a su vez, la influencia de estas variables en el comportamiento temporal del PM<sub>10</sub>.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 21** Comportamiento temporal del material particulado PM<sub>10</sub> vs Humedad Relativa (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

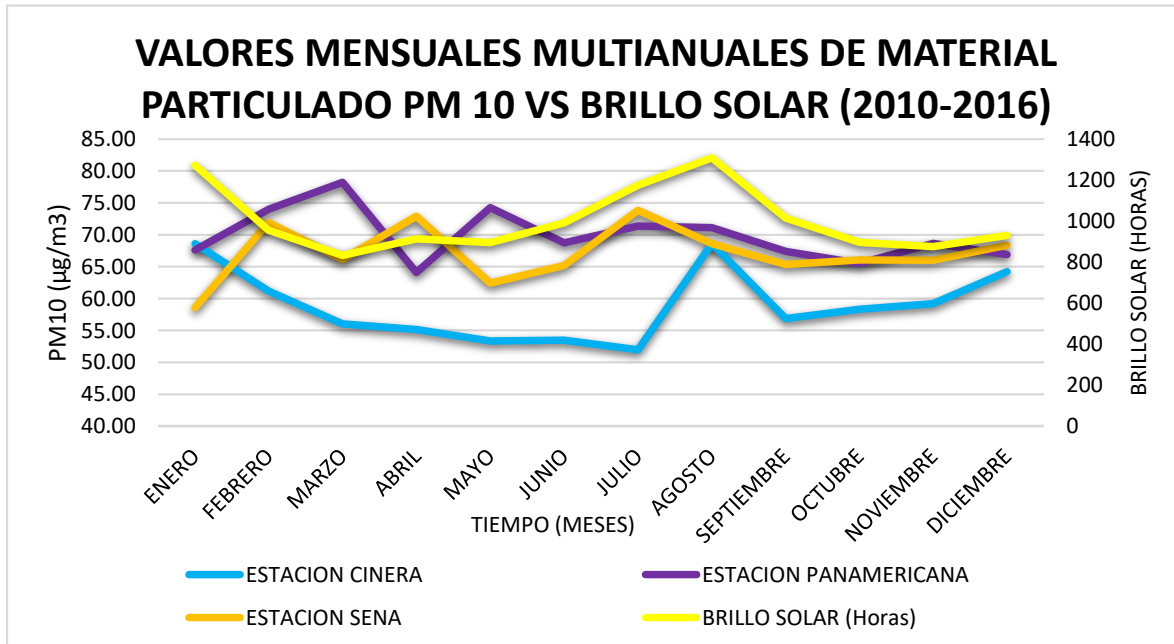
En la figura 22 se observa la relación entre los valores mensuales multianuales de material particulado PM<sub>10</sub> y brillo solar, para el periodo en estudio. El brillo solar influye directamente en las reacciones fotoquímicas que ocurren en la atmosfera, por ende, su relación con el material particulado PM<sub>10</sub> es inversamente proporcional, pues favorece la formación de contaminantes secundarios como el ozono troposférico. Sin embargo, los valores de PM<sub>10</sub> registrados en la estación Cinera presentan un comportamiento similar al del brillo solar, con leves variaciones a lo largo del año.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 22** Comportamiento temporal del material particulado PM<sub>10</sub> vs Brillo Solar (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

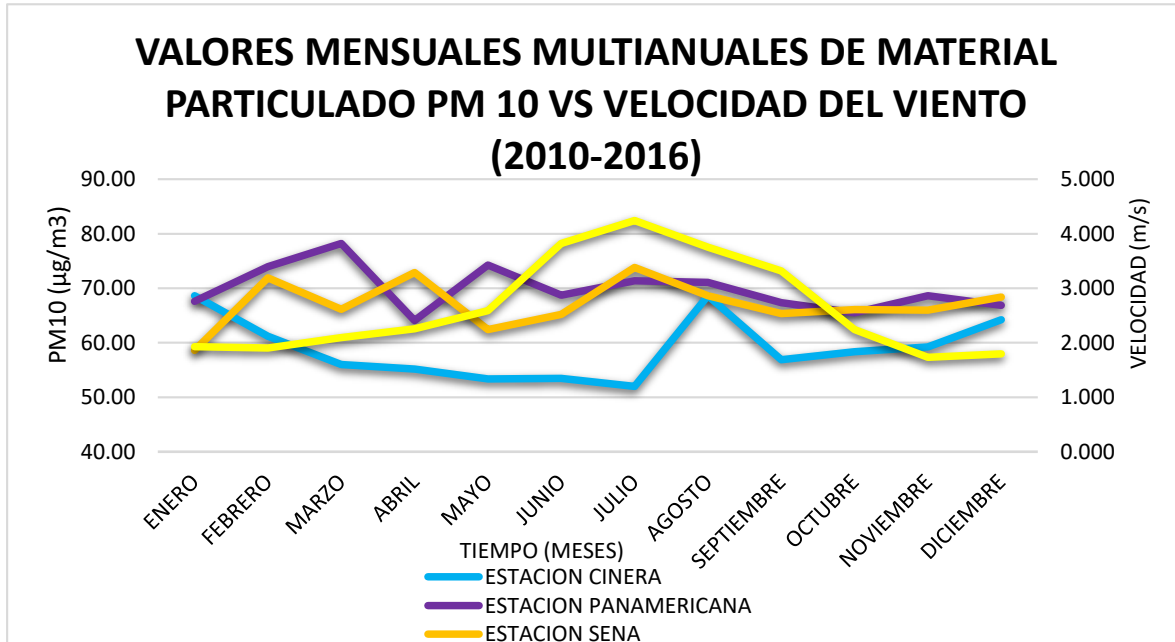
La figura 23 representa la variación temporal de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> registradas en las estaciones de monitoreo y el comportamiento temporal de la velocidad del viento. La relación que se presenta en la figura 22 entre la velocidad del viento y los valores de PM<sub>10</sub> es débil para los meses de junio y julio, en los que se presentan los valores máximos de velocidad del viento y las concentraciones de PM<sub>10</sub> son relativamente bajas, pues existen otros factores además de la velocidad del viento que influyen en las concentraciones de PM<sub>10</sub>. Sin embargo, para los meses de enero y diciembre (meses de vientos débiles) la relación se fortalece, con concentraciones altas de PM<sub>10</sub> y valores bajos de velocidad del viento, lo que concuerda con la teoría respecto a la relación entre estas dos variables, que indica que es inversamente proporcional, puesto que a mayor velocidad del viento es menor la concentración, mientras que la relación con la dispersión del PM<sub>10</sub> es directamente proporcional.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 23** Comportamiento temporal del material particulado PM10 vs Velocidad del Viento (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

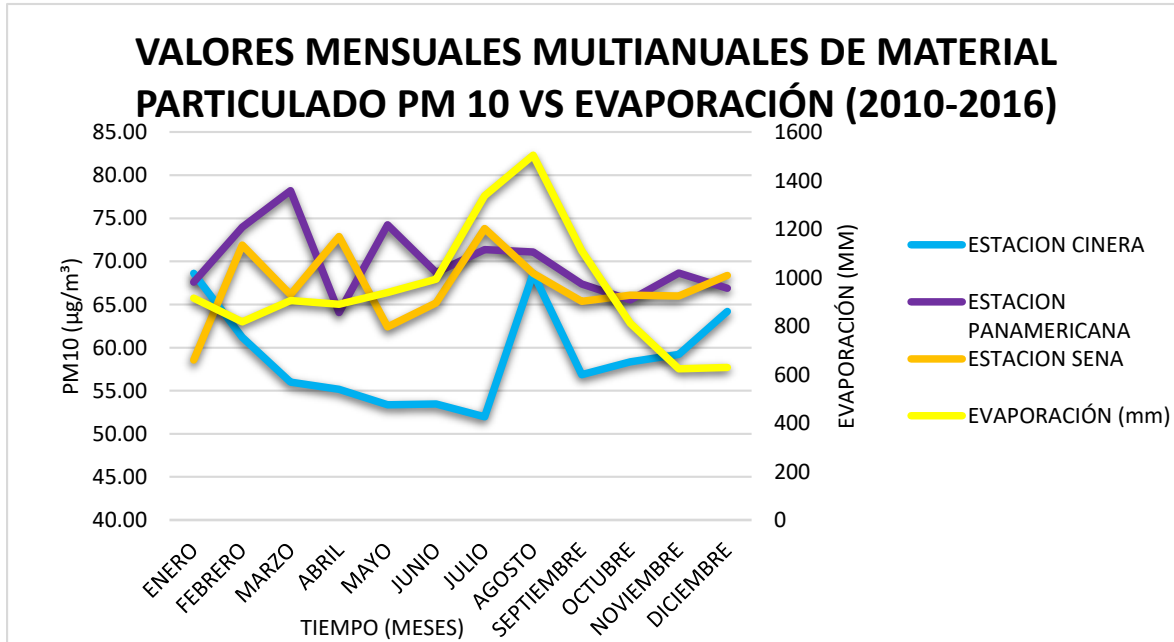
Por último, se presenta la comparación entre los valores mensuales multianuales de material particulado PM<sub>10</sub> y el comportamiento temporal de evaporación, para el periodo 2010-2016 (Ver figura 24). La relación que puede existir entre el material particulado PM<sub>10</sub> y la evaporación se deriva del tamaño y composición de las partículas, que puede variar por medio de procesos como la evaporación, a través de las colisiones del movimiento browniano por la hidrodinámica y fuerzas gravitacionales (Fang et al., 2006). El comportamiento que se observa en la figura 24 es similar al de la variable velocidad del viento (Figura 23), con valores máximos de evaporación en los meses de julio y agosto (concentraciones de PM<sub>10</sub> estables, con poca influencia de la evaporación) y valores mínimos para los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre (concentraciones relativamente altas de PM<sub>10</sub>).



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 24 Comportamiento temporal del material particulado PM10 vs Evaporación (2010-2016)



Fuente: Trujillo, J (2017)

### 13.3 CÁLCULO DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE (ICA)

Actualmente el municipio de Cúcuta no hace parte de las primeras cinco ciudades con mala calidad del aire en Colombia. Sin embargo, en vista del crecimiento desproporcionado de la población y el aumento de la actividad industrial que son factores que inciden en la generación de partículas, se hizo necesario evaluar la calidad del aire en el municipio, calculando el ICA por material particulado PM<sub>10</sub>.

En la Anexo III se presenta el cálculo del Índice de Calidad de Aire por PM<sub>10</sub>, para los valores anuales, mensuales multianuales y multianuales de material particulado registrado en las tres estaciones de monitoreo.

En el apartado 13.4 se presentan los valores calculados del ICA por PM<sub>10</sub>, para los valores registrados en las estaciones Cinera, Sena y Panamericana en el periodo 2010-2016, aplicando Sistemas de Información Geográfica para su análisis espacial.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Para complementar el análisis realizado. A continuación, se presenta una comparación entre los valores anuales de material particulado PM<sub>10</sub>, registrado en las tres estaciones de monitoreo y las tasas de mortalidad y morbilidad (número de personas) determinadas en el municipio de Cúcuta, por enfermedades asociadas al sistema respiratorio y circulatorio. En la tabla 11 se resume los valores de mortalidad y morbilidad determinados en el municipio de Cúcuta, por parte de la Secretaria Departamental de Salud.

**Tabla 11.** Tasas de mortalidad y morbilidad, municipio de Cúcuta (2010-2016)

AÑO	MORBILIDAD		MORTALIDAD	
	ENFERMEDADES DEL SISTEMA CIRCULATORIO	ENFERMEDADES DEL SISTEMA RESPIRATORIO	INFECCION RESPITATORIA AGUDA	ENFERMEDADES DEL SISTEMA CIRCULATORIO
<b>2010</b>	28,974	44,519	137	1095
<b>2011</b>	37,569	56,135	97	1070
<b>2012</b>	38,305	52,361	80	1027
<b>2013</b>	35,956	52,469	128	1183
<b>2014</b>	43,236	54,007	146	1210
<b>2015</b>	34,716	39,744		
<b>2016</b>	22,116	20,339		

Fuente: Trujillo, J (2017)

Se observa que, en el caso de la tasa de morbilidad, la cantidad de personas que han enfermado a lo largo de los años por afecciones del sistema respiratorio es mayor que las registradas por afecciones del sistema circulatorio; debido a factores asociados con contaminación atmosférica, por el aumento de la actividad industrial y el flujo vehicular en el municipio. En contraste, los casos de muerte por infección respiratoria aguda han disminuido a lo largo de los años, en comparación con las muertes asociadas a enfermedades del sistema circulatorio

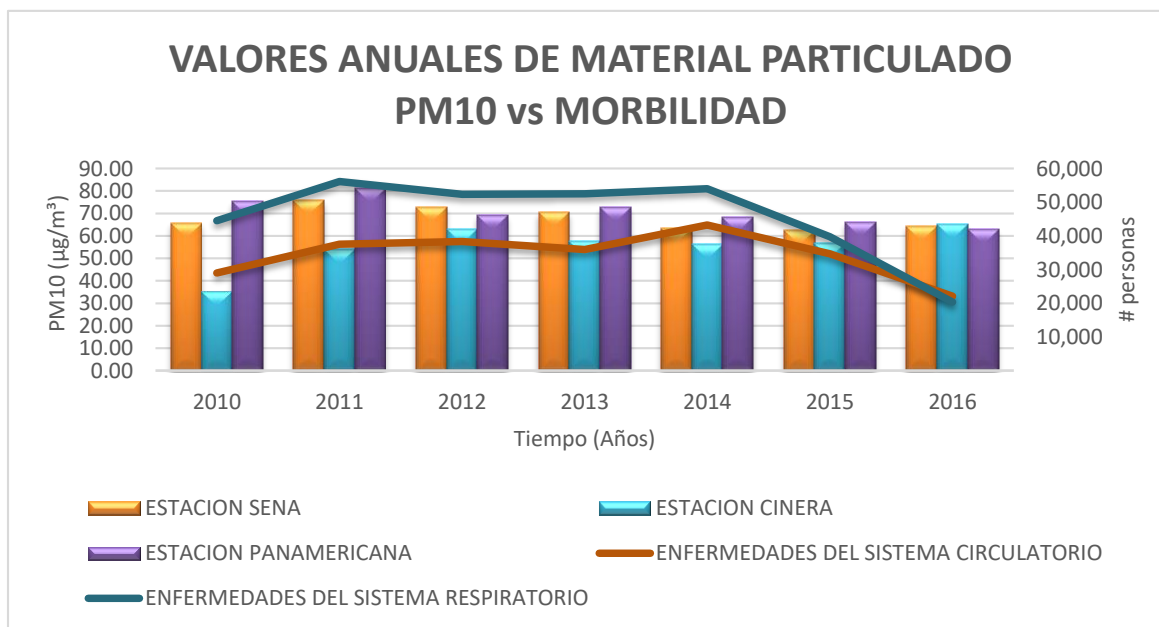
La figura 25 muestra la comparación entre los valores de PM<sub>10</sub> registrados en las estaciones de monitoreo y la tasa de morbilidad, determinada en el periodo 2010-2016. Como se mencionó anteriormente, es mayor la tasa de morbilidad por enfermedades asociadas al sistema respiratorio y, en comparación con los valores de PM<sub>10</sub>, se observa una relación entre los registrados por la estación Panamericana y la morbilidad por enfermedades del sistema respiratorio. Sin embargo, en los años 2015 y 2016 se observa una disminución en la tasa de morbilidad, tanto por enfermedades del sistema respiratorio como por enfermedades del sistema circulatorio.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



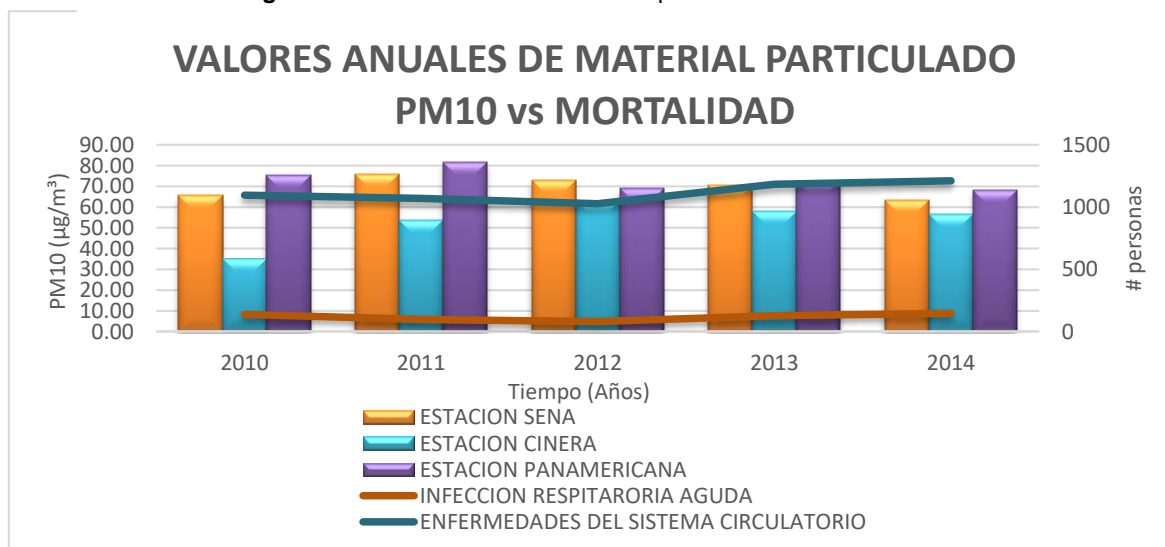
**Figura 25** Valores anuales de material particulado PM<sub>10</sub> vs Tasa de morbilidad



Fuente: Trujillo, J (2017)

La figura 26 muestra la comparación entre los valores de PM<sub>10</sub> registrados en las estaciones de monitoreo y la tasa de mortalidad, determinada en el periodo 2010-2014. El número de personas muertas por enfermedades del sistema circulatorio es mucho mayor que las muertes asociadas por afecciones del sistema respiratorio, debido a la gravedad de las enfermedades, sus causas, síntomas y la influencia que puede tener la contaminación generada por la emisión de material particulado PM<sub>10</sub>.

**Figura 26** Valores anuales de material particulado PM<sub>10</sub> vs Tasa de mortalidad



Fuente: Trujillo, J (2017)



## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 13.4 REPRESENTACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El análisis del comportamiento espacial de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> en el área del municipio de Cúcuta, emitidas por las diversas fuentes existentes y monitoreadas por las estaciones Cinera, Sena y Panamericana permite identificar y determinar las áreas-fuente críticas de contaminación.

A continuación, se presenta el análisis espacial de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> realizado en la plataforma ArcGis, para el periodo de muestreo 2010-2016, en el municipio de Cúcuta, Norte de Santander. De igual manera, se incluyen las rosas de vientos realizadas para el periodo de muestreo, y la distribución espacial del Índice de Calidad del Aire (ICA) en el municipio, para cada tipo de análisis (Anual, Mensual Multianual y Multianual).

#### 13.4.1 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL ANUAL

Este apartado incluye el análisis espacio-temporal de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> para cada uno de los años de muestreo en las estaciones de calidad del aire del municipio de Cúcuta (2010-2016).

En las figuras 27 y 28 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2010 y el Índice de Calidad del Aire para este año. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 29).

Como se observa en la figura 27, las máximas concentraciones de PM<sub>10</sub> se registran en la estación Panamericana, ubicada en cercanías al aeropuerto Camilo Daza, en el que diariamente se emiten contaminantes a la atmósfera debido a la entrada y salida de aviones. Así mismo, la Calidad del Aire para este año se clasificó como Moderada en esta estación, representada por el color amarillo (rango entre 51-100). De acuerdo a esto, los posibles efectos a la salud a los que estaba expuesta la población cercana a la estación Panamericana son posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles. La calidad del aire por los valores de PM<sub>10</sub> registrados en la estación Cinera se clasificó como Buena (ICA entre 0-50); esta clasificación se corrobora con los valores relativamente bajos registrados en esta estación para este año. La estación Sena presenta valores intermedios entre los registrados por Cinera y Panamericana y la calidad del aire en este caso se clasifica como moderada (ICA entre 51-100). La rosa de vientos para el año 2010 (figura 29) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 0.5 y 2.1 m/s.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Figura 26 Material Particulado PM<sub>10</sub> año 2010

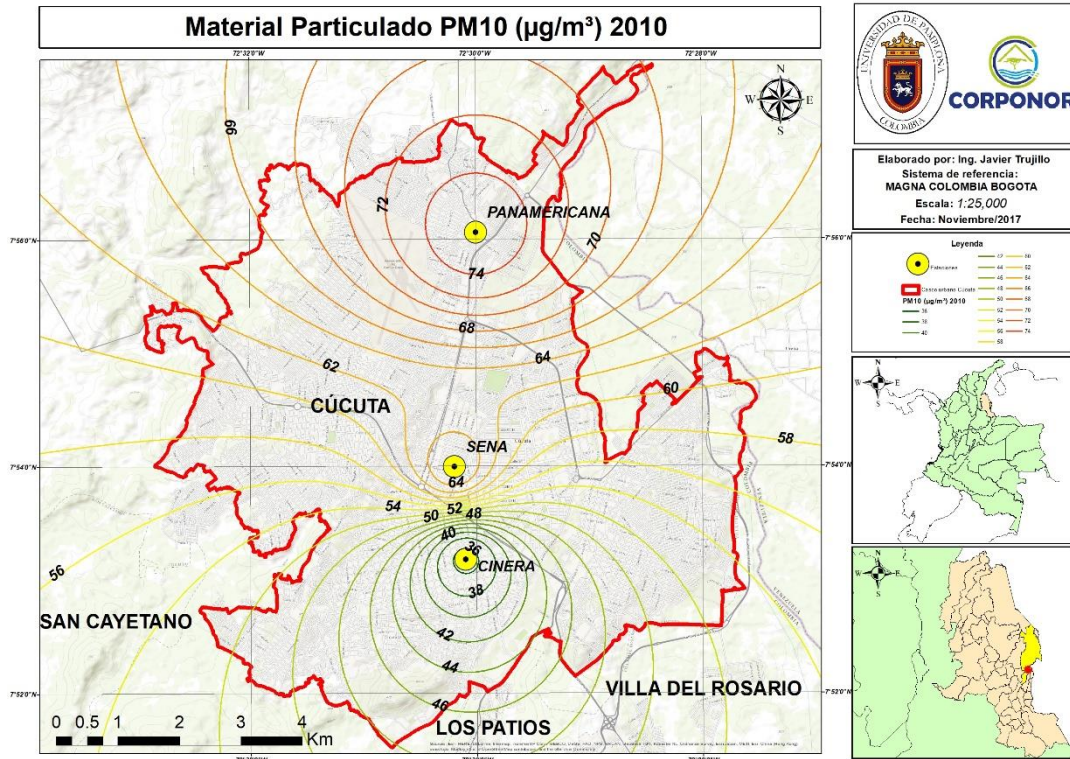
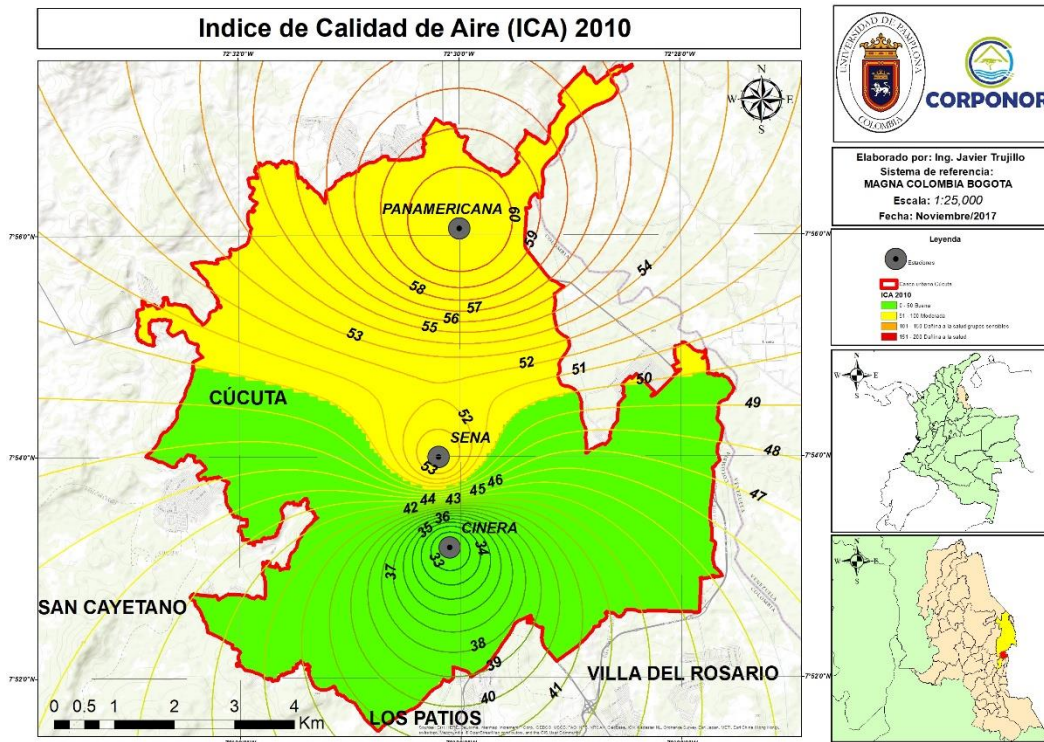


Figura 27 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2010

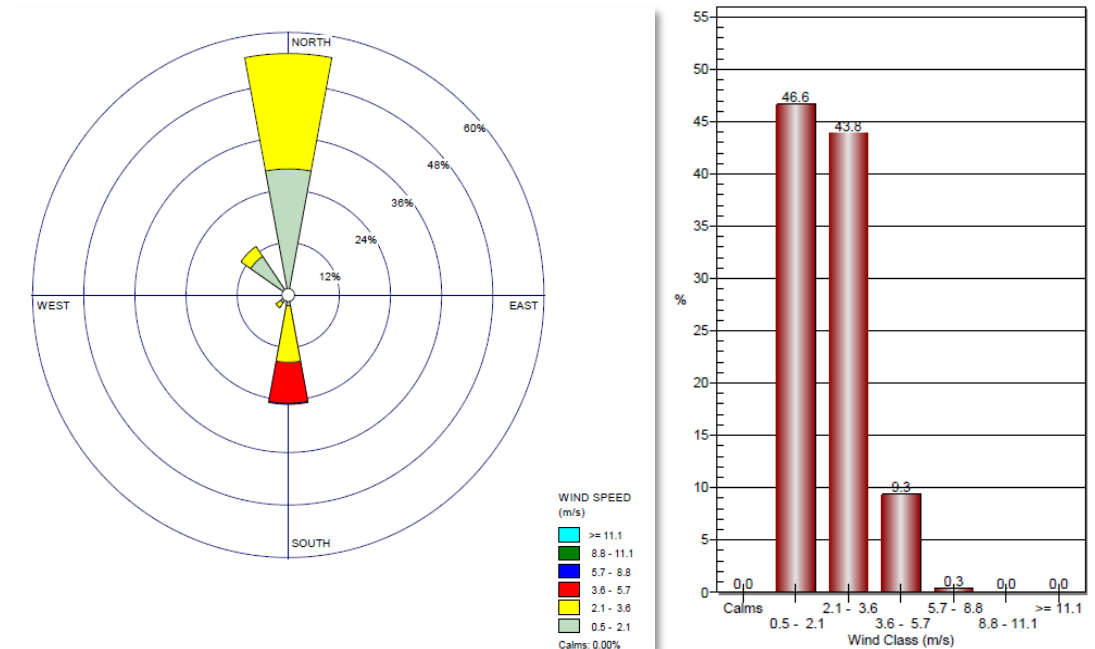




## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 28 Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2010



Fuente: Trujillo, J (2017)

En las figuras 30 y 31 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2011 y el Índice de Calidad del Aire para este año. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 32).

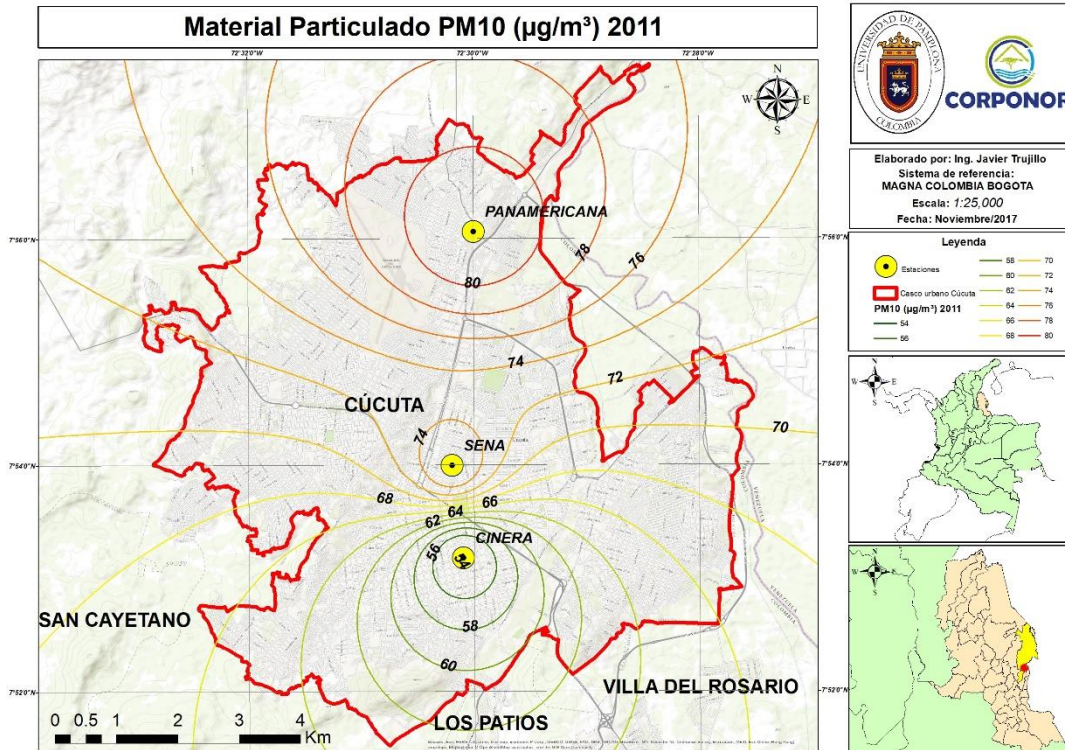
En la figura 30 se observa que los valores de material particulado PM<sub>10</sub> se concentran en la estación Panamericana, al igual que para el año anterior (Figura 27), debido a la influencia de la actividad aérea y el transporte de partículas. La estación Cinera presenta las menores concentraciones registradas, en comparación con Sena y Panamericana. La estación Sena, caracterizada por la generación de partículas de origen residencial, industrial y flujo vehicular en los alrededores registra valores intermedios entre Cinera y Panamericana. Teniendo en cuenta la dispersión y transporte de las partículas que vienen desde el sur (Figura 32), las concentraciones de PM<sub>10</sub> son mayores en esta estación respecto a Cinera, y menores a las registradas por Panamericana.



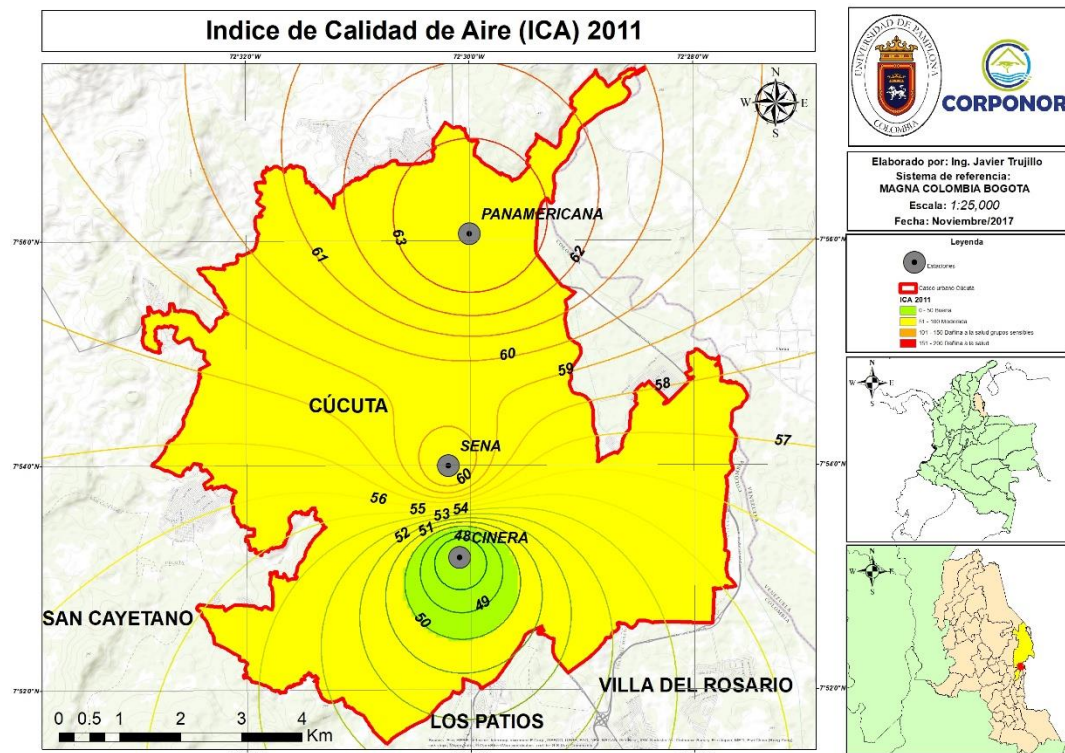
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 30 Material Particulado PM10 año 2011**



**Figura 29 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2011**



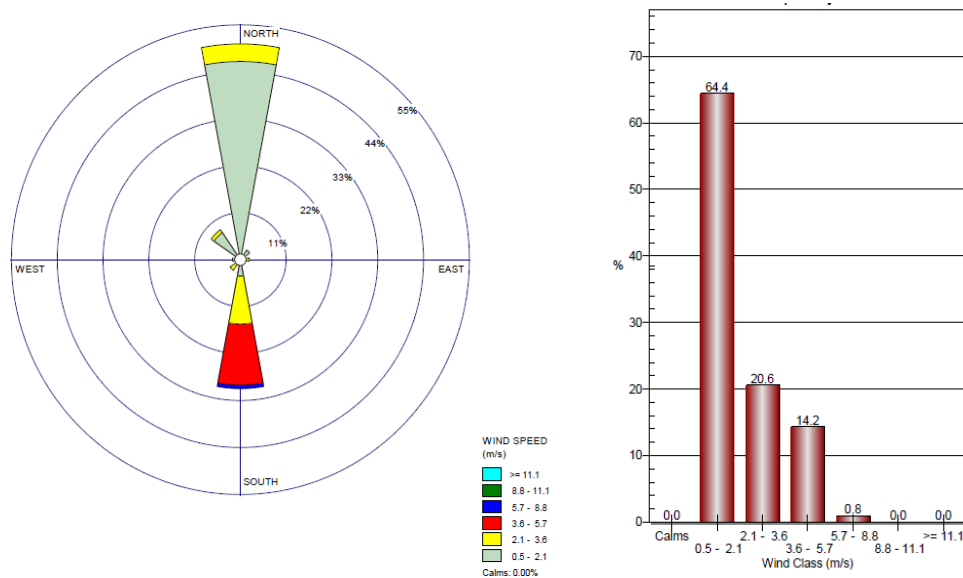


**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



La figura 31 representa la distribución espacial del Índice de Calidad del Aire para el año 2011. La calidad del aire en la estación Cinera se clasifica como Buena, de acuerdo al rango de valores del ICA (0-50). En las estaciones Sena y Panamericana la calidad del aire se clasifica como Moderada (color amarillo), correspondiente a un rango de 51-100. Esta clasificación indica que, aunque son valores relativamente “moderados”, es necesario analizar con mayor detalle estos valores calculados y la incidencia que pueden tener a futuro, al incrementarse las concentraciones de PM<sub>10</sub>. La rosa de vientos para el año 2011 (figura 32) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 0.5 y 2.1 m/s; lo que comprueba las mayores concentraciones registradas por la estación Panamericana en este año.

**Figura 31** Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2011



Fuente: Trujillo, J (2017)

En las figuras 33 y 34 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2012 y el Índice de Calidad del Aire para este año. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 35). En este año se presentan concentraciones más elevadas en la estación Cinera, respecto a los años anteriores. Así mismo, la estación Sena es la que registra las máximas concentraciones de PM<sub>10</sub> en este año, superando a los registrados en la estación Panamericana, lo que indica que hubo un incremento en la actividad industrial y flujo vehicular en los alrededores y en cercanías a la estación Cinera (caracterizada por la quema de combustibles fósiles, derivada del flujo vehicular).



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Figura 32 Material Particulado PM10 año 2012

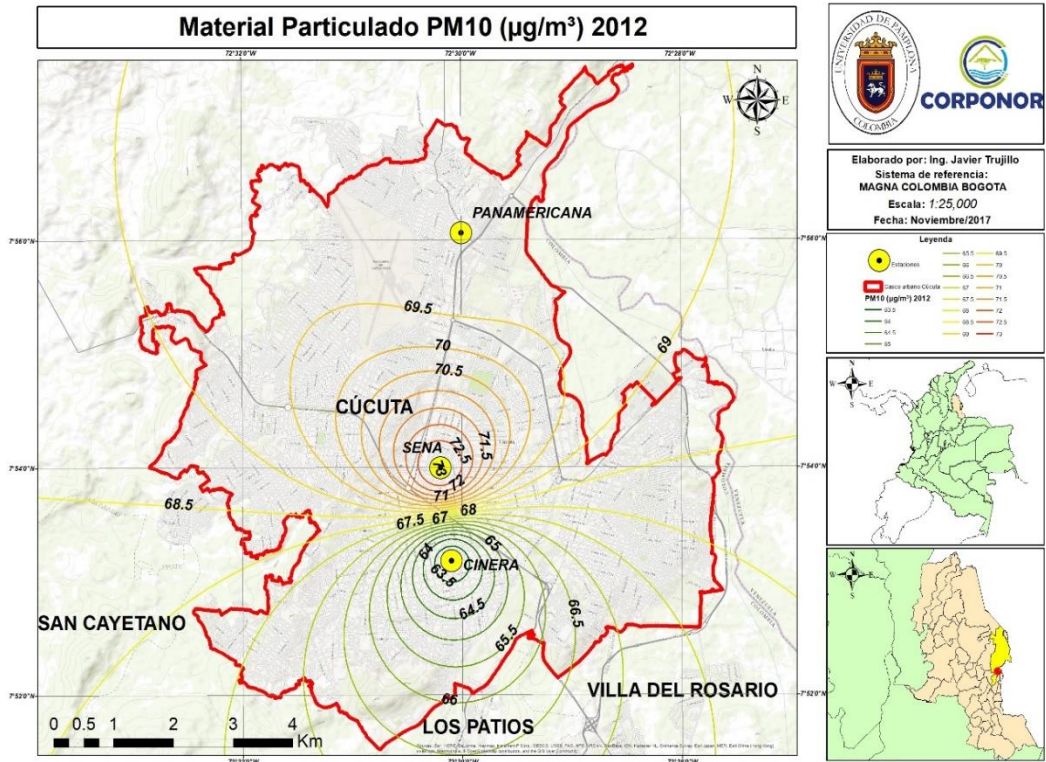
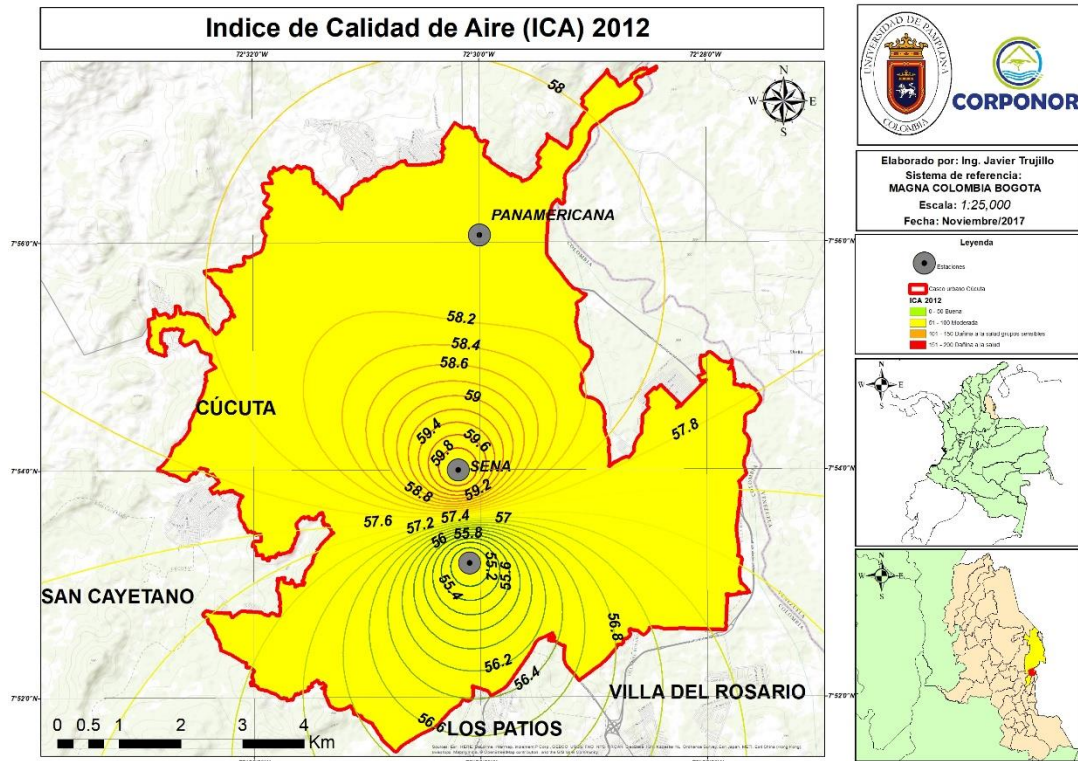


Figura 33 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2012



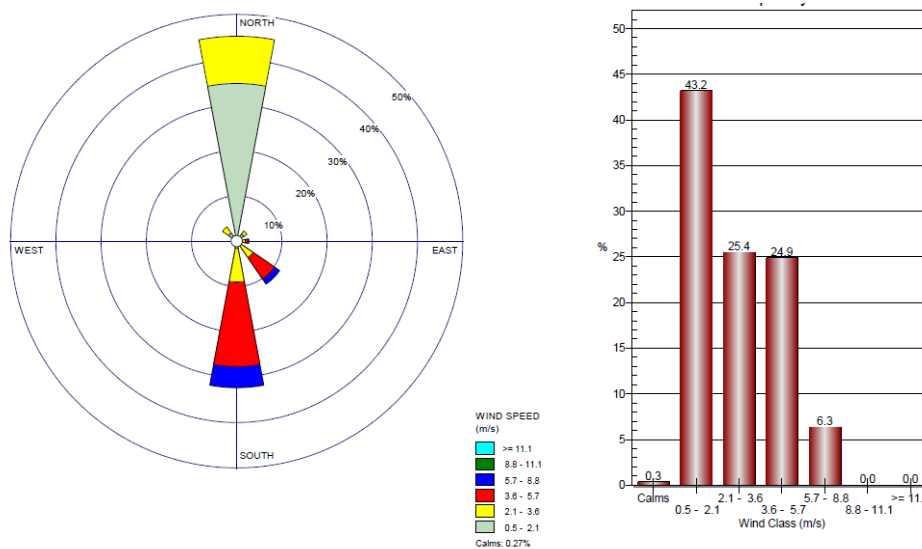


## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



En la figura 34 se observa que, en general, la calidad del aire de acuerdo al cálculo del ICA se clasifica como Moderada, con valores en el rango de 51-100; esto debido al aumento a la actividad industrial y flujo vehicular, sobretodo en los alrededores de las estaciones Cinera y Sena, pues en la estación Panamericana se ha mantenido el rango de “moderada” desde el año 2010. La rosa de vientos para el año 2012 (figura 35) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 0.5 y 2.1 m/s.

Figura 34 Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2012



Fuente: Trujillo, J (2017)

En las figuras 36 y 37 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2013 y el Índice de Calidad del Aire para este año. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 38).

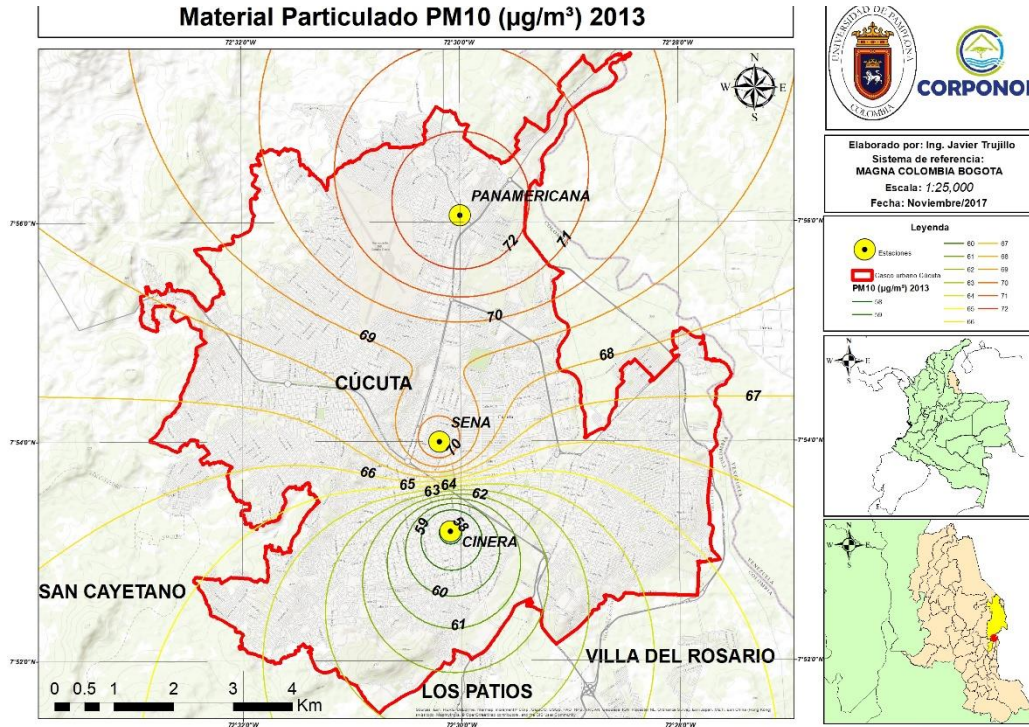
Para este año se mantiene la tendencia de presentarse las máximas concentraciones en la estación Panamericana, los valores intermedios en Sena y los mínimos en Cinera, derivados de las actividades que se realizan diariamente en los alrededores de cada estación y la influencia de variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento. Sin embargo, ha habido un aumento considerable en las concentraciones de PM<sub>10</sub>, sobretodo en la estación Cinera, comparando con los registrados en 2010 y 2011.



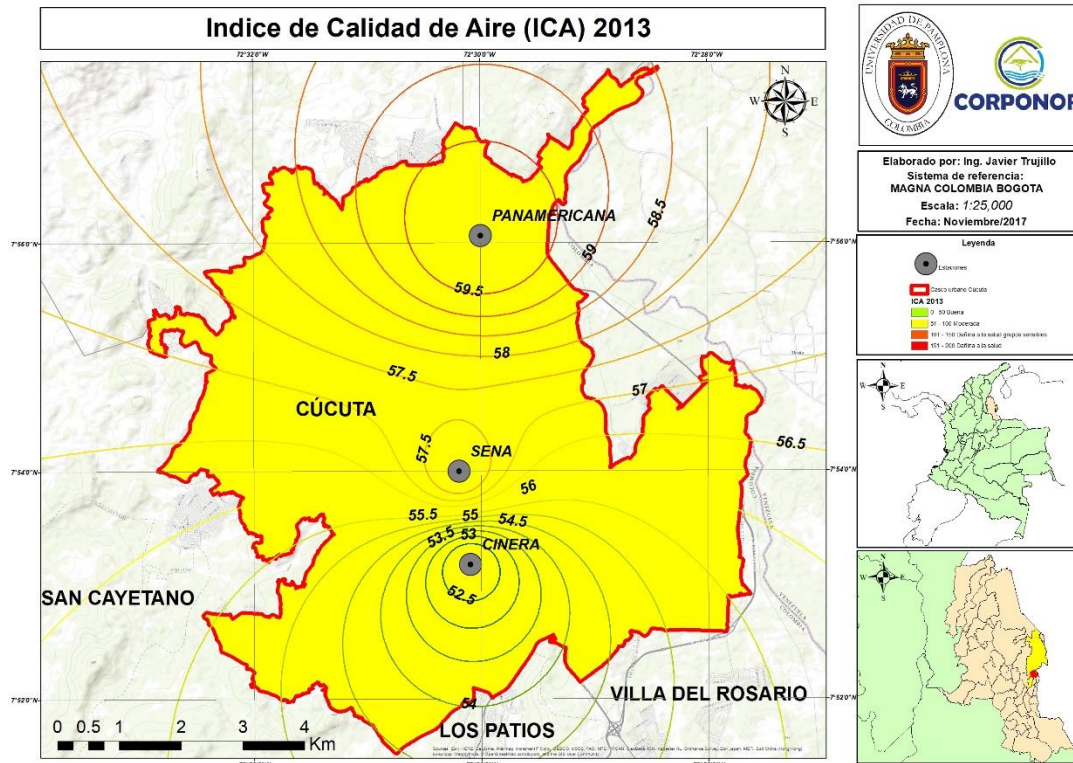
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 35 Material Particulado PM<sub>10</sub> año 2013**



**Figura 36 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2013**





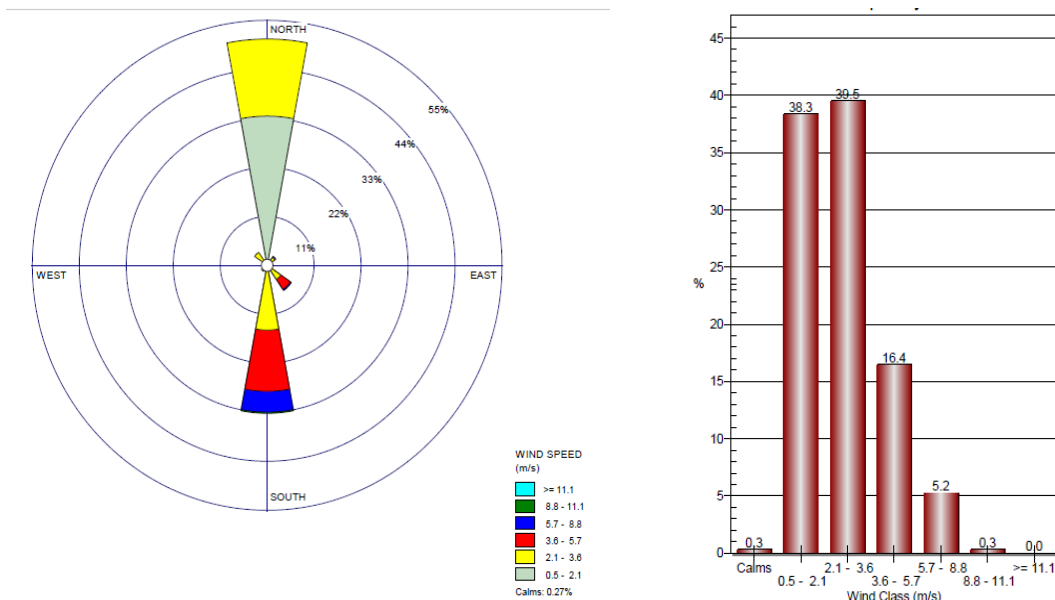
**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Respecto al Índice de Calidad del Aire (Figura 37) se observa que los valores calculados del ICA para cada estación se clasifican como “Moderada” (entre 51-100), con valores cercanos a 50 y tendientes a la clasificación de buena calidad del aire. La rosa de vientos para el año 2013 (figura 38) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 2.1-3.6 m/s.

C

**Figura 37** Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2013



**Fuente:** Trujillo, J (2017)

En las figuras 39 y 40 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2014 y el Índice de Calidad del Aire para este año. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 41).

Para este año, los valores de PM<sub>10</sub> registrados por las tres estaciones de monitoreo son relativamente cercanos, con pequeñas variaciones en la estación Cinera, que presenta algunos valores por debajo de 60 µg/m<sup>3</sup>. La estación Panamericana continúa registrando las máximas concentraciones de PM<sub>10</sub>, puesto que la actividad industrial realizada en los alrededores ha incrementado a lo largo de los años.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Figura 38 Material Particulado año 2014

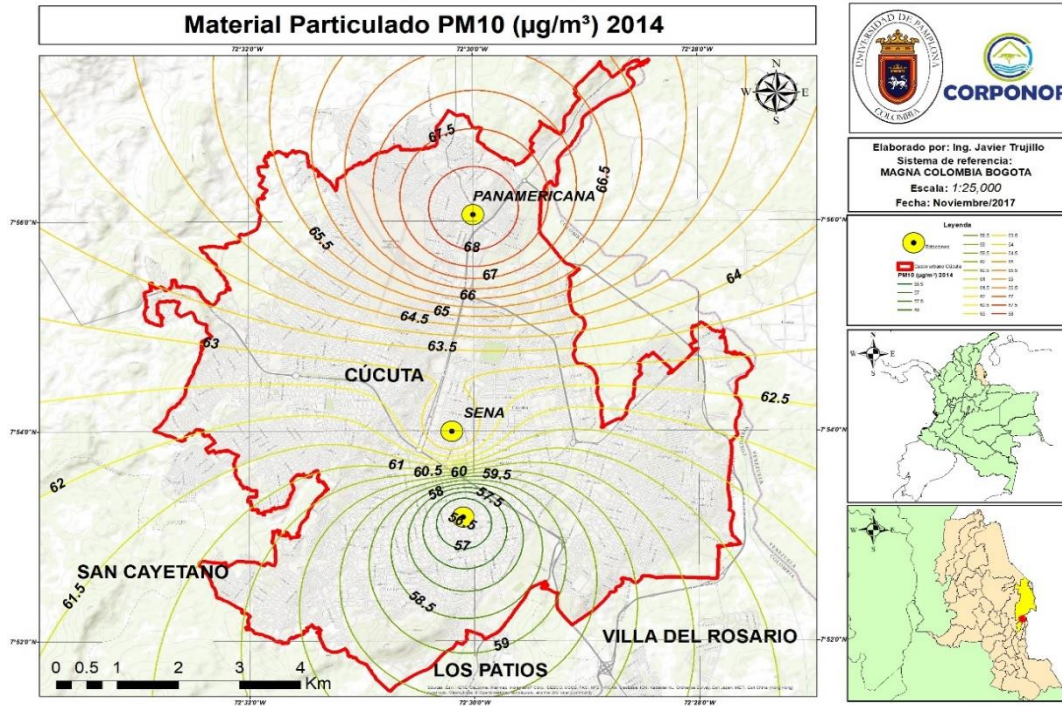
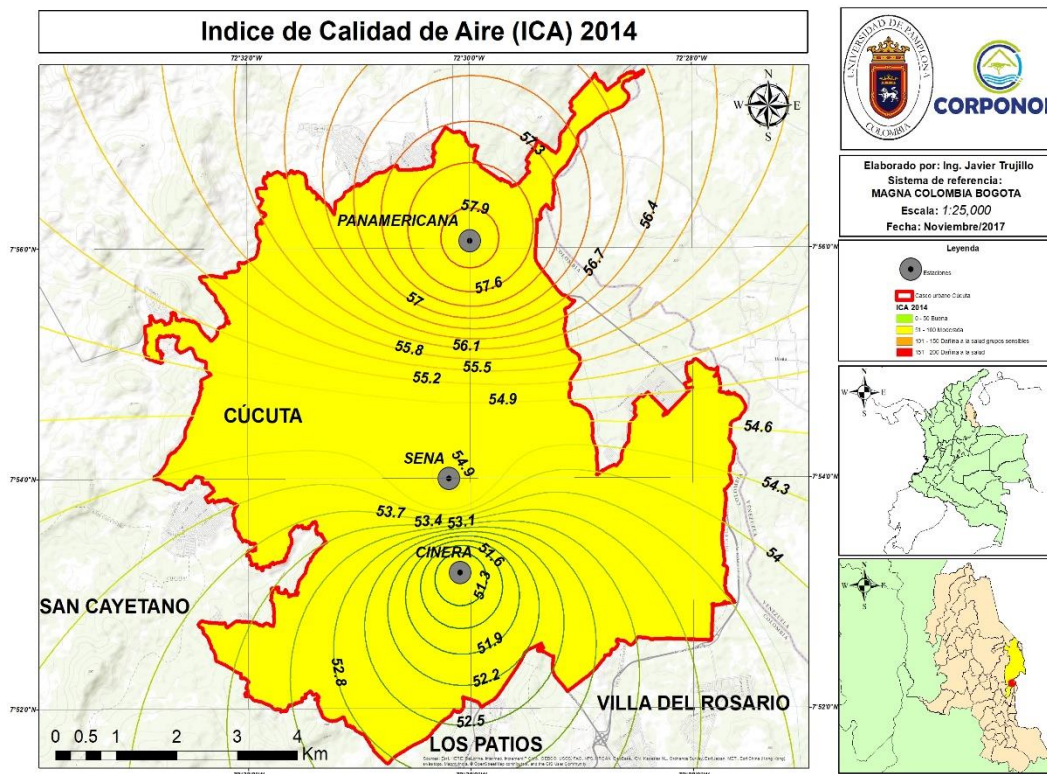


Figura 39 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2014



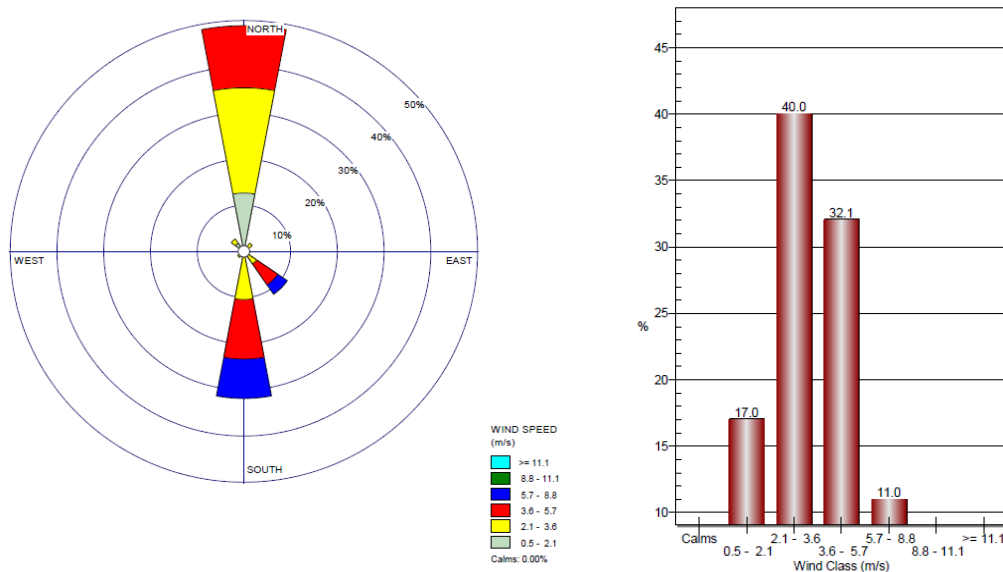


## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Al igual que en el año anterior (Figura 37), la calidad del aire en las tres estaciones se clasifica como “Moderada”, con valores relativamente cercanos a 50 (Ver figura 40), que indican un leve cambio en la calidad del aire y que no se considera significativo o que pueda afectar a la salud de las personas que habitan en los alrededores de las tres estaciones. La rosa de vientos para el año 2014 (figura 41) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 2.1-3.6 m/s.

Figura 40 Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias 2014



Fuente: Trujillo, J (2017)

En las figuras 42 y 43 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2015 y el Índice de Calidad del Aire para este año.

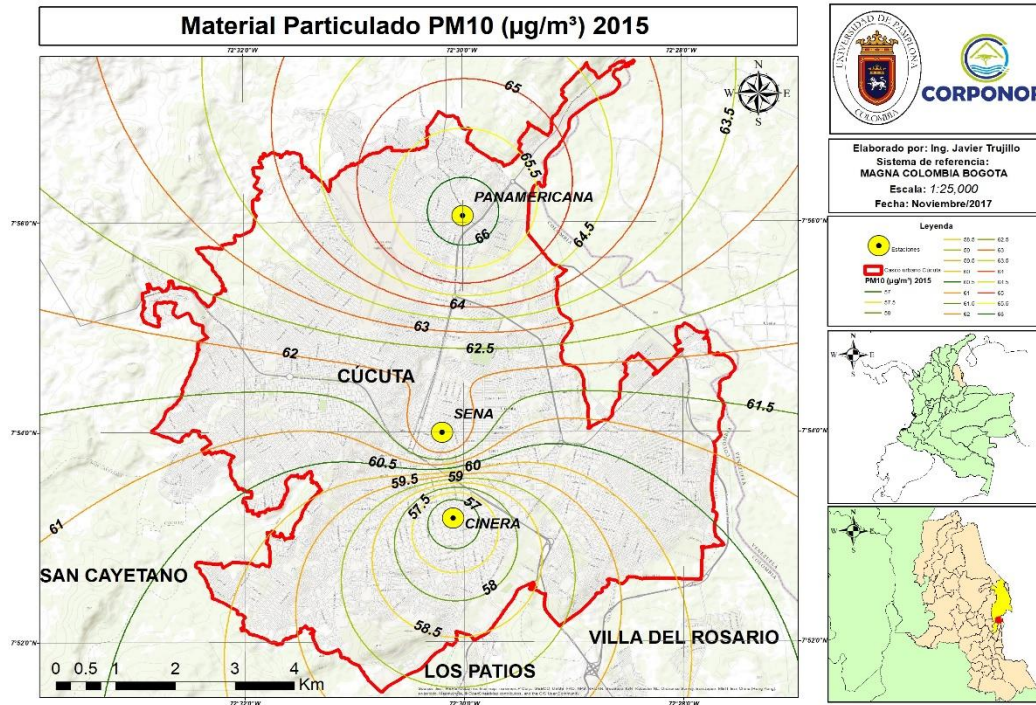
Como se observa en la figura 42, los mayores valores de PM<sub>10</sub> se registran en la estación Panamericana. Aunque, en comparación con años anteriores, las concentraciones han disminuido (teniendo en cuenta la influencia de las variables meteorológicas). La estación Cinera mantiene el registro de concentraciones entre 50 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y Sena registra valores cercanos a 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Respecto al Índice de Calidad del Aire (Figura 43), se observa que los valores se mantienen en el rango de 51 a 100, perteneciente a la clasificación “Moderada” y, al igual que en años anteriores, los valores se acercan a 50, indicando que para este año se presentó poca afectación a la salud por material particulado PM<sub>10</sub>.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 41 Material Particulado año 2015**



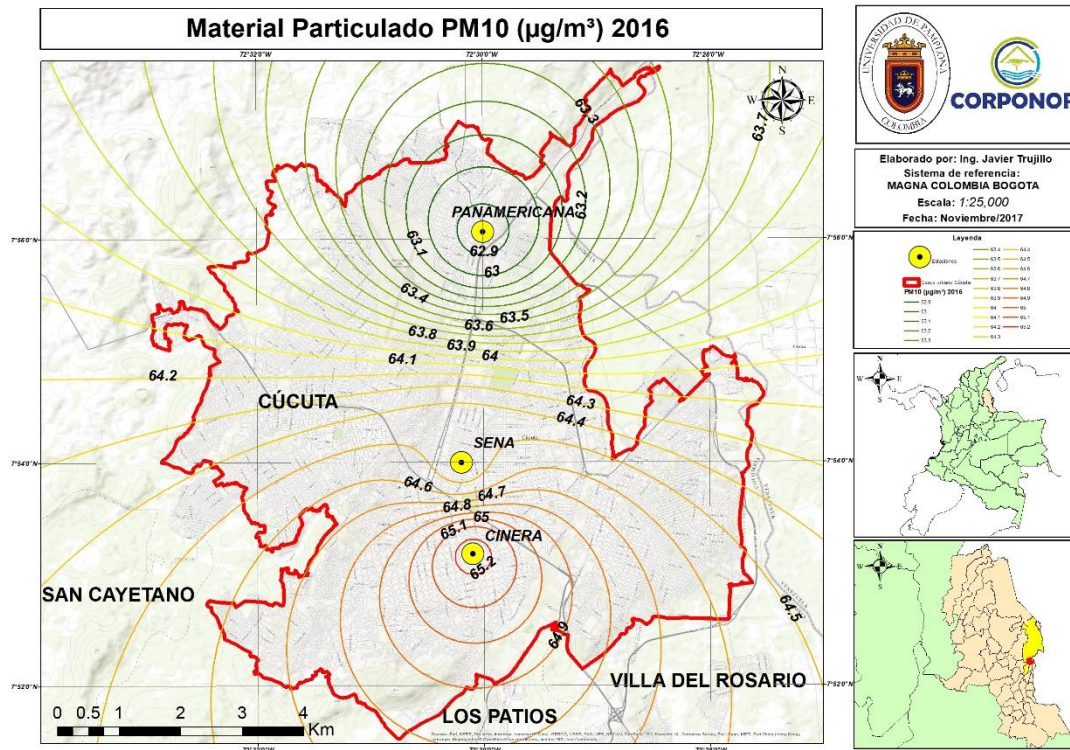


**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



En las figuras 44 y 45 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del año 2016 y el Índice de Calidad del Aire para este año.

**Figura 43 Material Particulado año 2016**



Fuente: Trujillo, J (2017)

De acuerdo a los valores representados en las figuras 44 y 45, se infiere que las mayores concentraciones se registran en la estación Panamericana y sus alrededores, de acuerdo a factores anteriormente mencionados. De igual manera, en las estaciones Cinera y Sena se presentó un aumento en las concentraciones de PM<sub>10</sub>, en comparación con 2015.

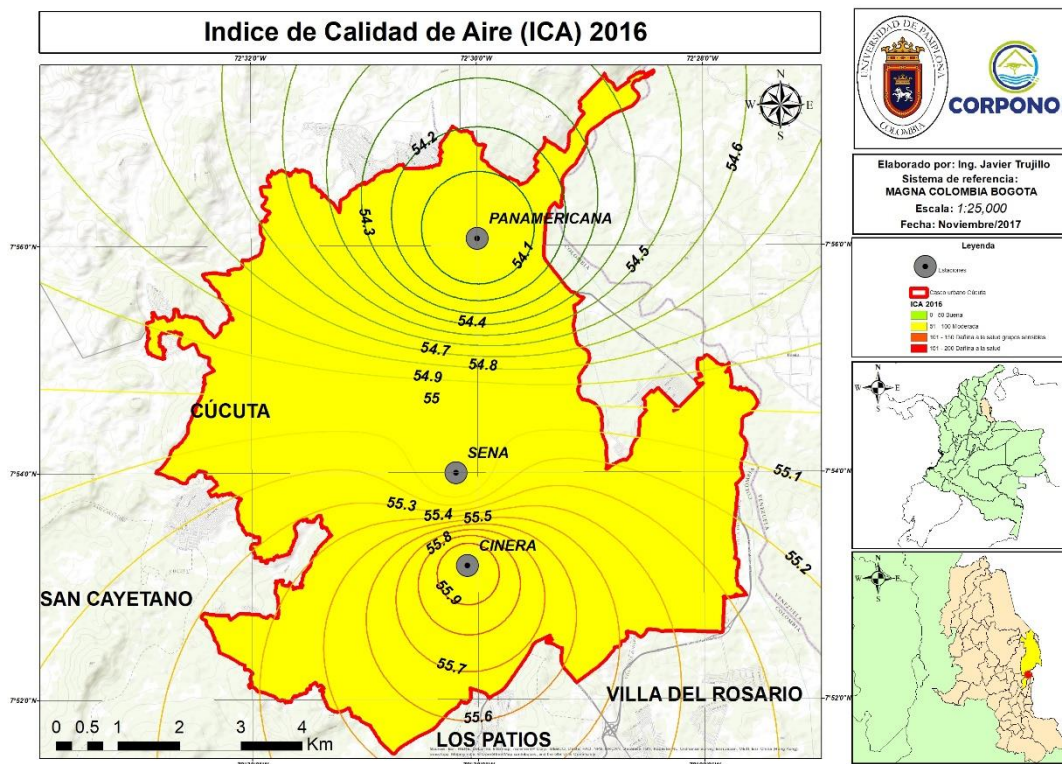
En el caso del Índice de Calidad del Aire, los valores calculados se mantienen en la clasificación “Moderada”, en el rango 51-100, con valores cercanos a 50 y demuestran que, a pesar de que las concentraciones aumentaron, los valores del ICA permanecen constantes. Sin embargo, se deben tomar acciones preventivas respecto a esta clasificación, por las posibles afectaciones a la salud (sobretudo para aquellas personas extremadamente sensibles y con problemas respiratorios).



## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 44 Índice de Calidad de Aire (ICA) 2016



### 13.4.2 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL MENSUAL MULTIANUAL

Este apartado contiene el análisis espacio-temporal mensual multianual de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> registradas en las estaciones de calidad del aire del municipio de Cúcuta para el periodo 2010-2016.

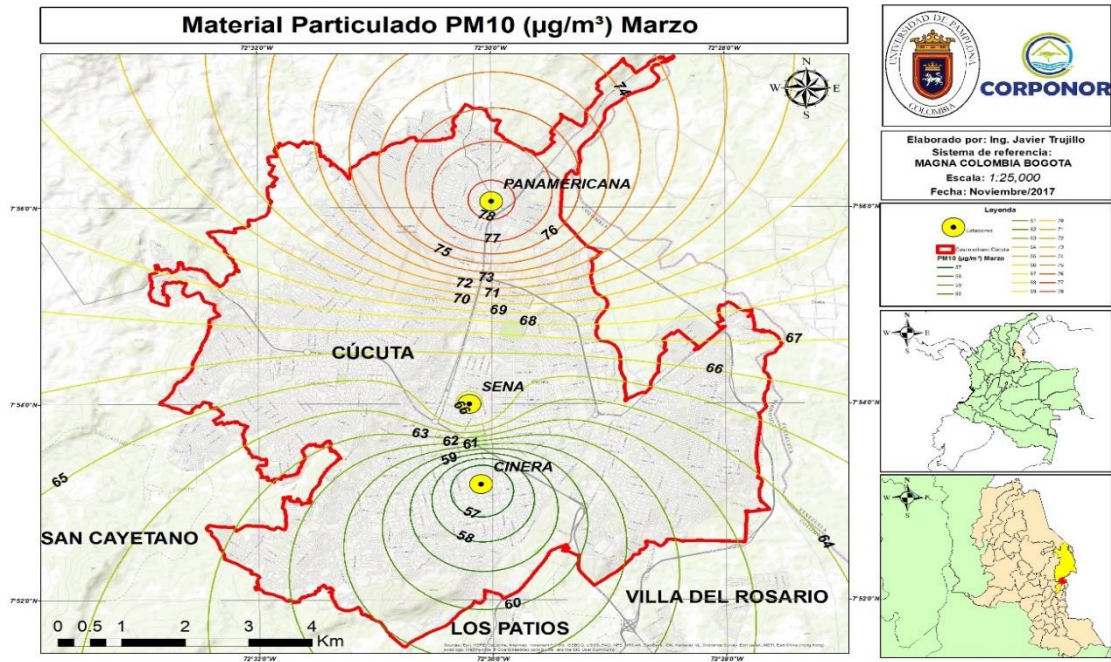
En las figuras 46 y 47 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de marzo y el Índice de Calidad del Aire para este mes. Como se observa, en el mes de marzo se presentan las máximas concentraciones en la estación Panamericana, valores muy altos en comparación con los registrados por Cinera y Sena. En cuanto al ICA se observa que en la estación Cinera, la calidad del aire se clasifica como “Buena”, de acuerdo a los valores calculados, que oscilan entre 0-50. En las estaciones Sena y Panamericana la Calidad del Aire se clasifica como “moderada”, con valores en el rango de 51-100 y cercanos a 50, indicando una leve afectación a la salud durante este es.



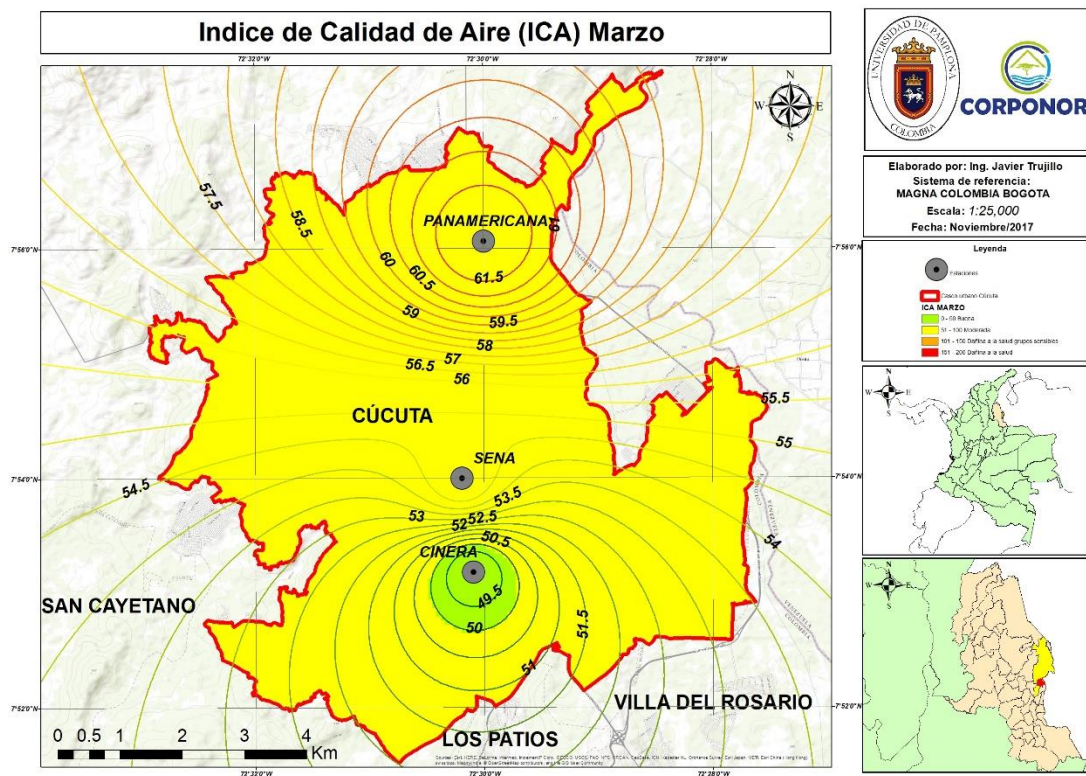
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 45 Material Particulado PM<sub>10</sub> Marzo**



**Figura 46 Índice de Calidad de Aire (ICA) Marzo**





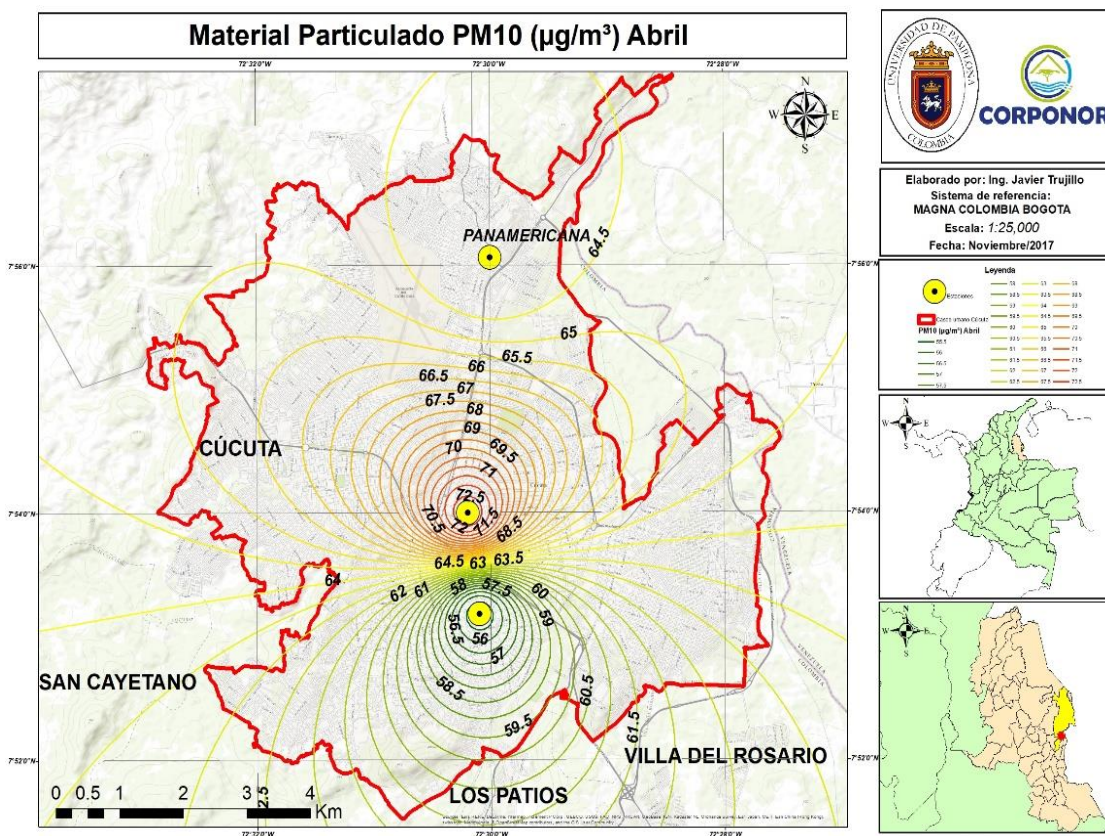
## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



En las figuras 48 y 49 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de abril y el Índice de Calidad del Aire para este mes.

Se observa que las concentraciones máximas se registran en la estación Sena, seguido de Panamericana y Cinera; esto indica que el flujo vehicular ha aumentado en este mes, a lo largo de los años. En el caso de Cinera, los valores de PM<sub>10</sub> no presentan mayor variación, en comparación con marzo. El Índice de Calidad del Aire en la estación Cinera indica una clasificación “Buena”, mientras que en Sena y Panamericana se clasifica como “Moderada”, con valores próximos a 50 y que no se consideran perjudiciales para salud. Sin embargo, es importante tener presente estos valores, para prevenir posibles exposiciones a concentraciones elevadas de PM<sub>10</sub> en los alrededores de las estaciones de monitoreo y, en general, en el municipio.

Figura 47 Material Particulado PM<sub>10</sub> Abril

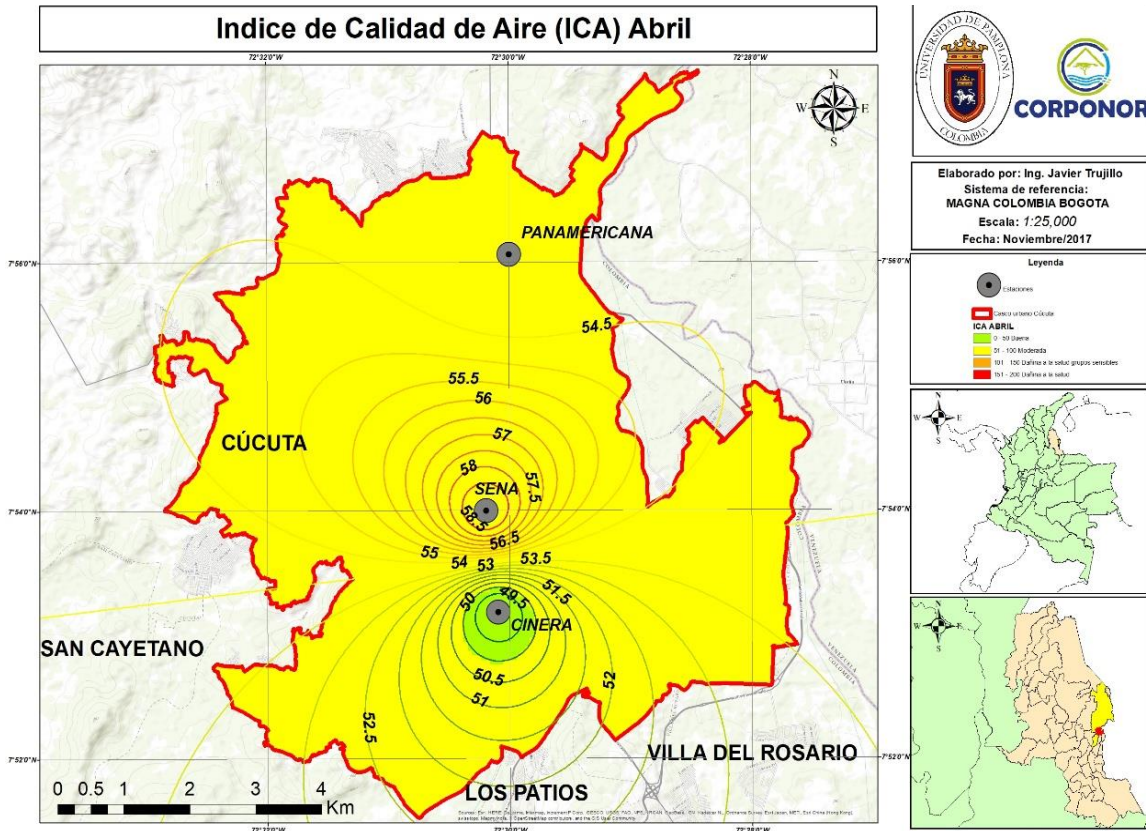




**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 48** Índice de Calidad de Aire (ICA) Abril



En las figuras 50 y 51 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de mayo y el Índice de Calidad del Aire para este mes.

De acuerdo a lo representado en la figura 50, en las estaciones Cinera y Sena se presentan las menores concentraciones de PM<sub>10</sub> durante el mes de mayo. Así mismo, la estación Panamericana registra los máximos valores de PM<sub>10</sub>, teniendo en cuenta la dispersión y transporte de partículas que vienen del Sur (estaciones Cinera y Sena), el transporte aéreo y la ubicación de la estación en una zona de alta actividad industrial. Con respecto al Índice de Calidad del Aire se observa que, tanto la estación Sena como Panamericana se clasifican en el rango de “Moderada” y la calidad del aire en la estación Cinera se clasifica como “Buena”, al igual que en los meses anteriores.



# DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 49 Material Particulado PM<sub>10</sub> Mayo

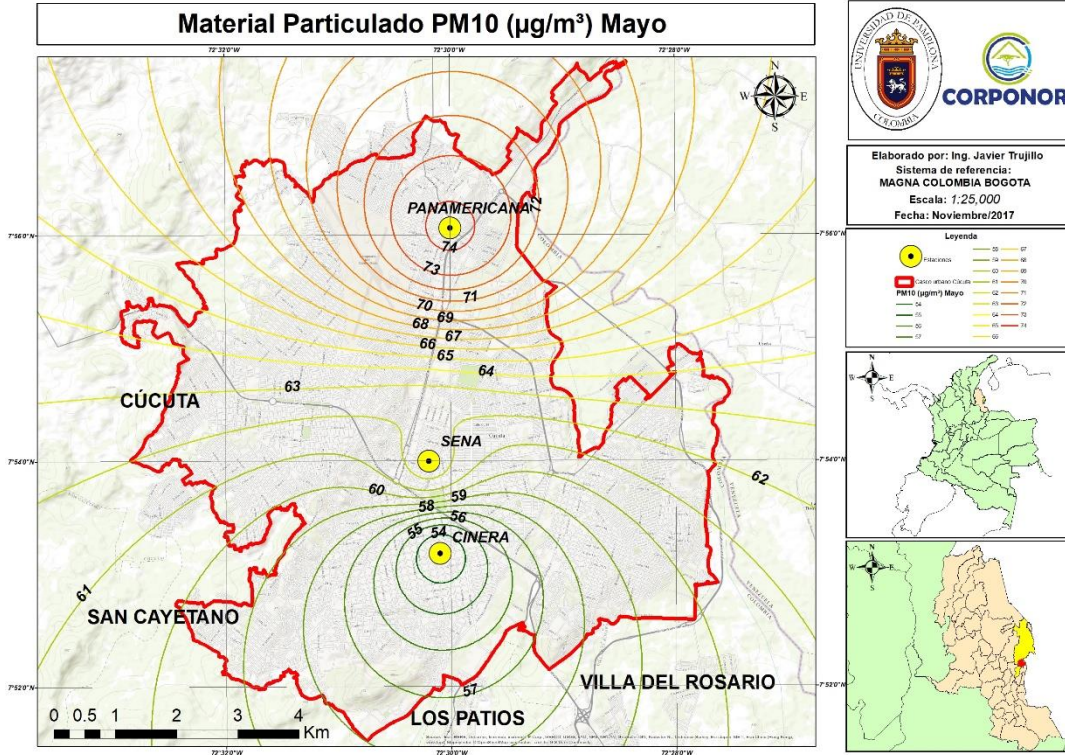
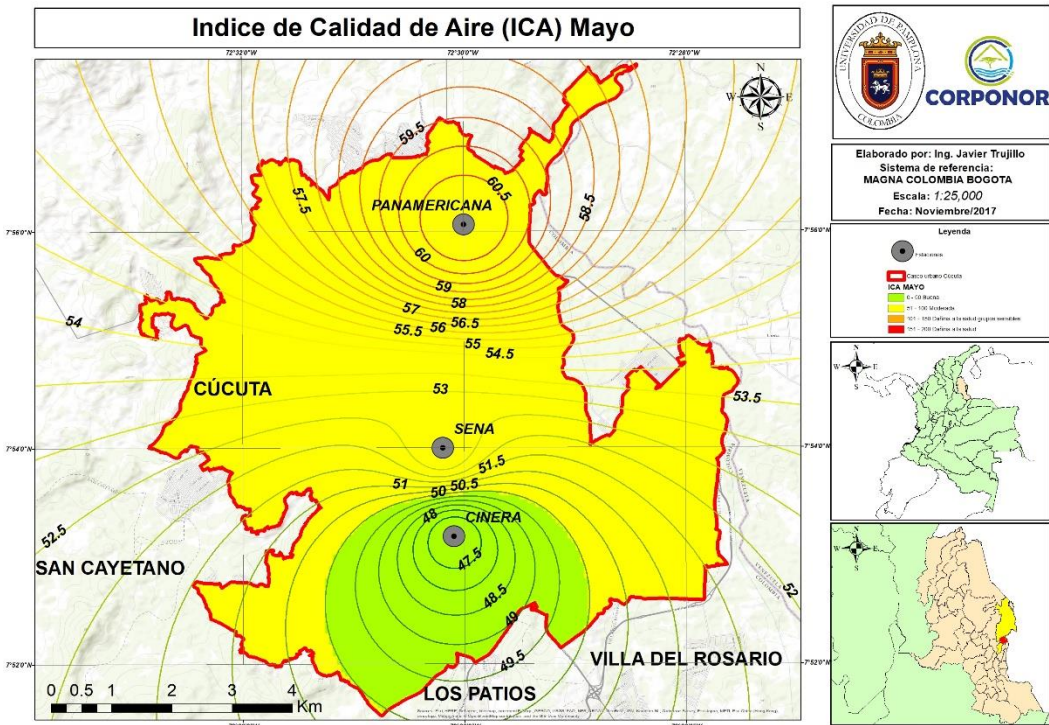


Figura 50 Índice de Calidad de Aire (ICA) Mayo





**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**

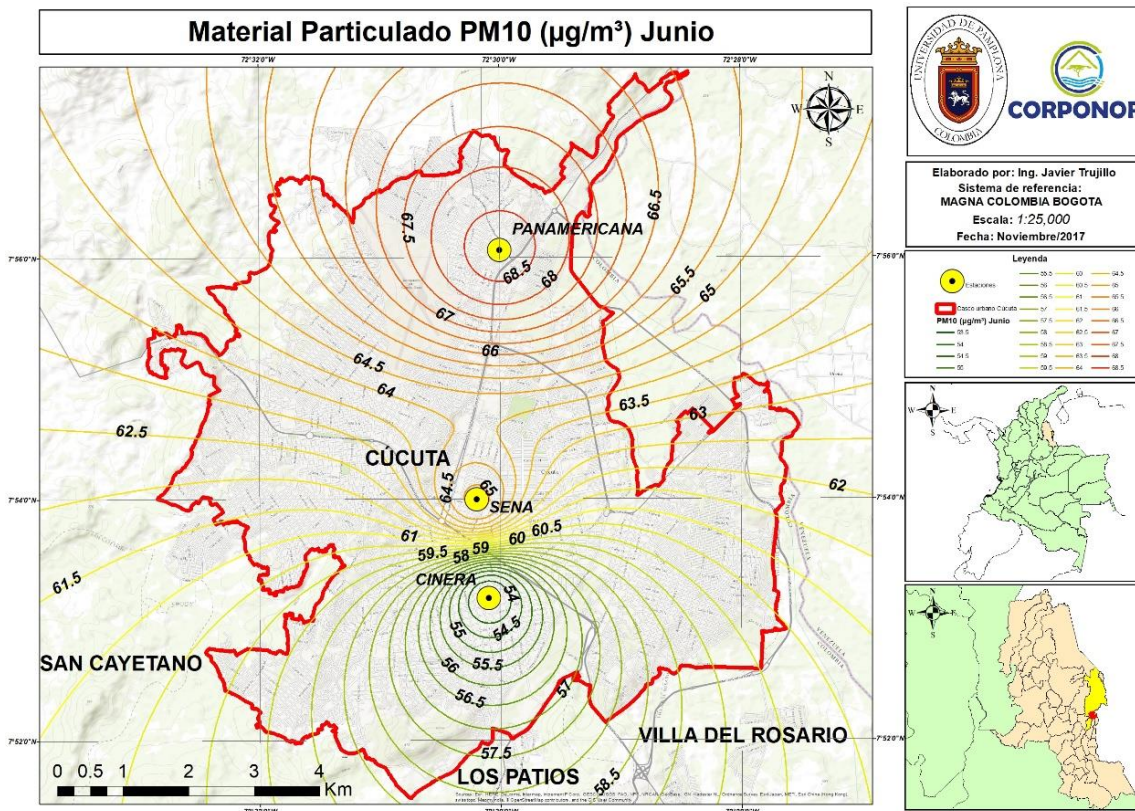


En las figuras 52 y 53 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de junio y el Índice de Calidad del Aire para este mes.

En el mes de junio se presentan concentraciones relativamente altas en la estación Panamericana, concentraciones entre 50 y 60 µg/m<sup>3</sup> en la estación Cinera y concentraciones alrededor de los 60 µg/m<sup>3</sup> en Sena con leves variaciones respecto a meses anteriores.

El Índice de Calidad del Aire para el mes de junio presenta gran similitud al calculado para mayo, con una clasificación de “Moderada” en las estaciones Sena y Panamericana y “Buena” para la estación Cinera y valores alrededor de 50.

**Figura 51 Material Particulado PM<sub>10</sub> Junio**



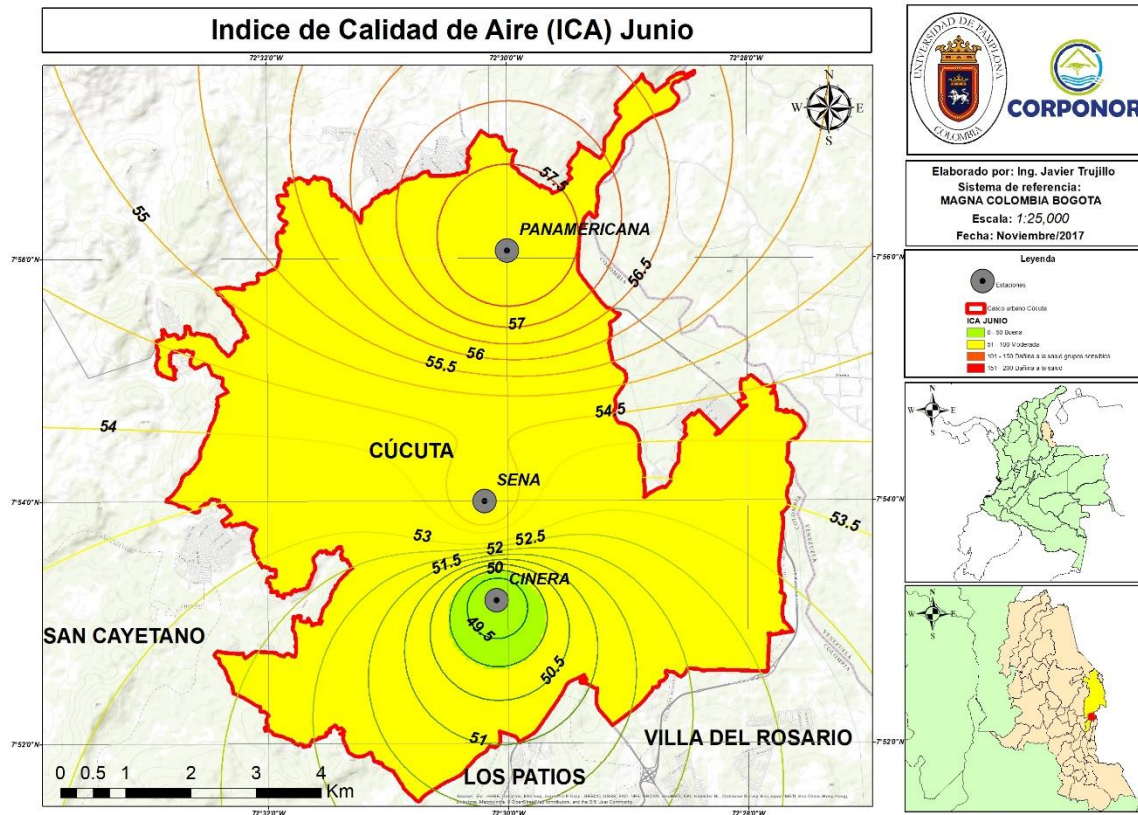
Fuente: Trujillo, J (2017)



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 52 Índice de Calidad de Aire (ICA) Junio**



Fuente: Trujillo, J (2017)

En las figuras 54 y 55 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de agosto y el Índice de Calidad del Aire para este mes.

El comportamiento espacial del material particulado PM<sub>10</sub> para el mes de agosto se asemeja al analizado en el mes de mayo (Figura 50), pues los máximos valores se registran en Panamericana y oscilan alrededor de 70 µg/m<sup>3</sup> y en Cínera y Sena, las concentraciones oscilan entre los 60 y 70 µg/m<sup>3</sup>. Es importante mencionar que las altas concentraciones registradas en Panamericana se deben a la dispersión y transporte de las partículas, movimientos influenciados directamente por los vientos, que se hacen más fuertes durante este mes. Respecto al ICA, se observa que para las tres estaciones su clasificación es “Moderada”, con valores entre 51-100 y más altos que los determinados en los anteriores meses, que indican posibles focos de contaminación por PM<sub>10</sub> presentados durante este mes y que pueden incidir en la salud de los habitantes del municipio.



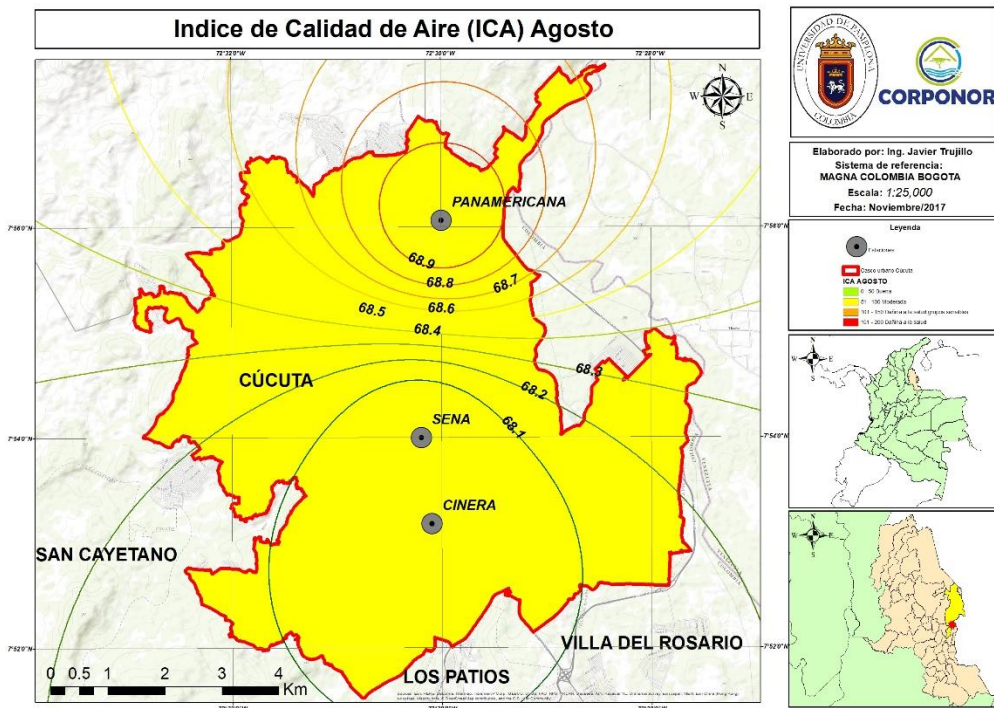
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Figura 53 Material Particulado PM<sub>10</sub> Agosto



Figura 54 Índice de Calidad de Aire (ICA) Agosto





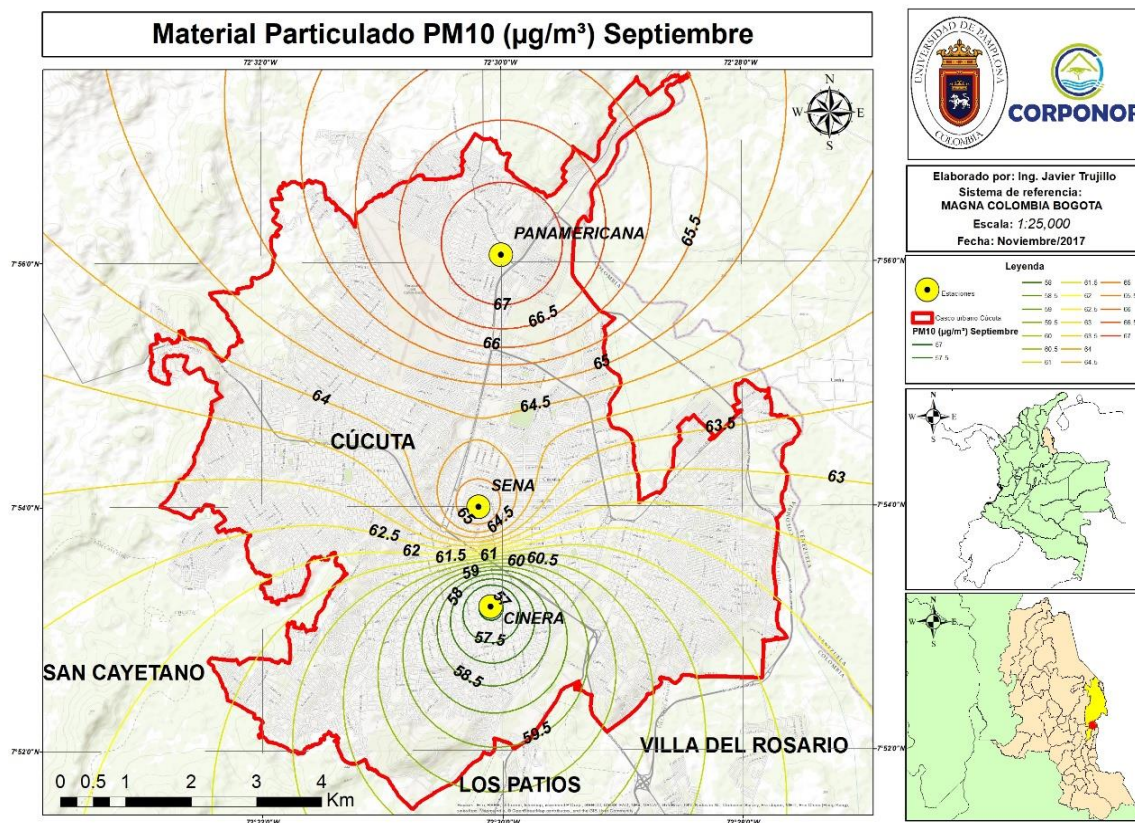
**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



En las figuras 56 y 57 se presentan los mapas referentes al comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> del mes de septiembre y el Índice de Calidad del Aire para este mes.

Para septiembre se presentan valores relativamente elevados en Panamericana, pero menores a los registrados en agosto. Respecto a Cinera y Sena, las concentraciones de PM<sub>10</sub> oscilan entre los 50 y 60 µg/m<sup>3</sup> y disminuyeron, en comparación con agosto. El Índice de Calidad del Aire para este mes, en las tres estaciones de monitoreo se clasifica como “Moderada” al igual que el mes anterior, pero con valores cercanos a 50 que indican poca afectación a la salud.

**Figura 55 Material Particulado PM<sub>10</sub> Septiembre**



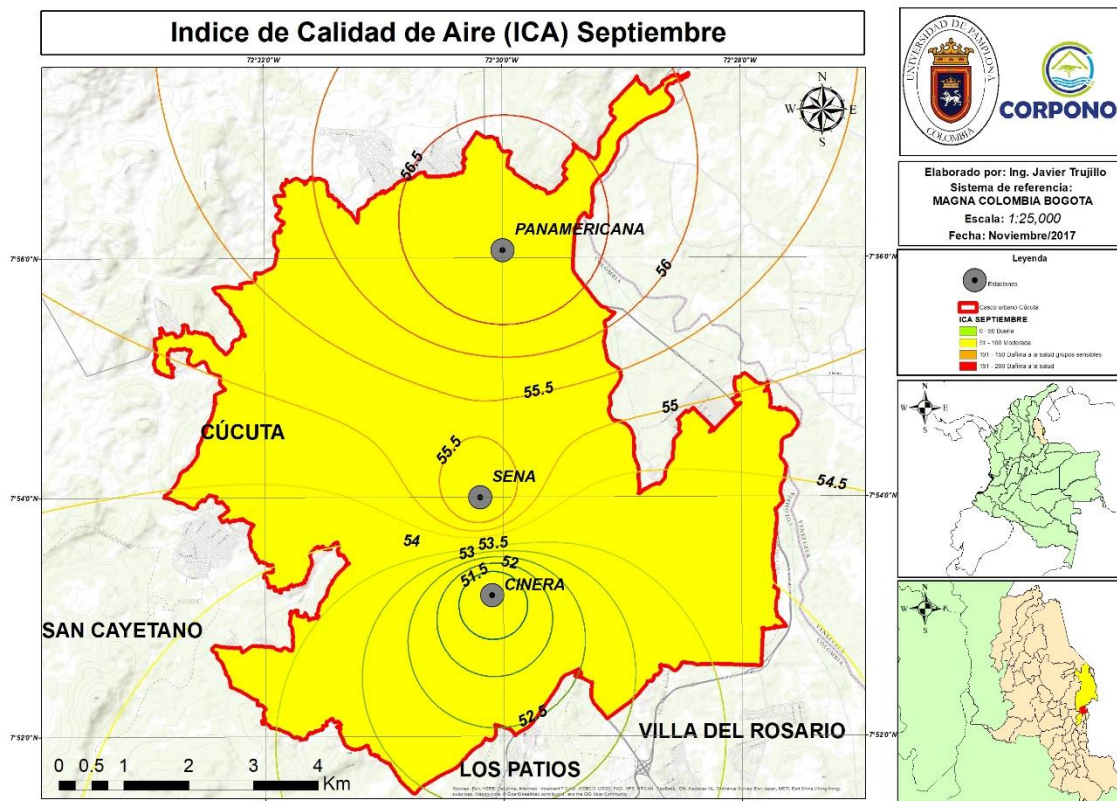
Fuente: Trujillo, J (2017)



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 56** Índice de Calidad de Aire (ICA) Septiembre



Fuente: Trujillo, J (2017)

La representación espacial de las concentraciones de PM<sub>10</sub> y el Índice de calidad del aire de los demás meses se presentan en el anexo IV.

### 13.4.3 ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL MULTIANUAL

Este apartado encierra el análisis espacio-temporal multianual de las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub> registradas en las estaciones de calidad del aire del municipio de Cúcuta para el periodo 2010-2016.

En las figuras 58 y 59 se presentan los mapas referentes al comportamiento multianual del material particulado PM<sub>10</sub> y el Índice de Calidad del Aire multianual. Igualmente se muestra la respectiva rosa de vientos (Figura 60).

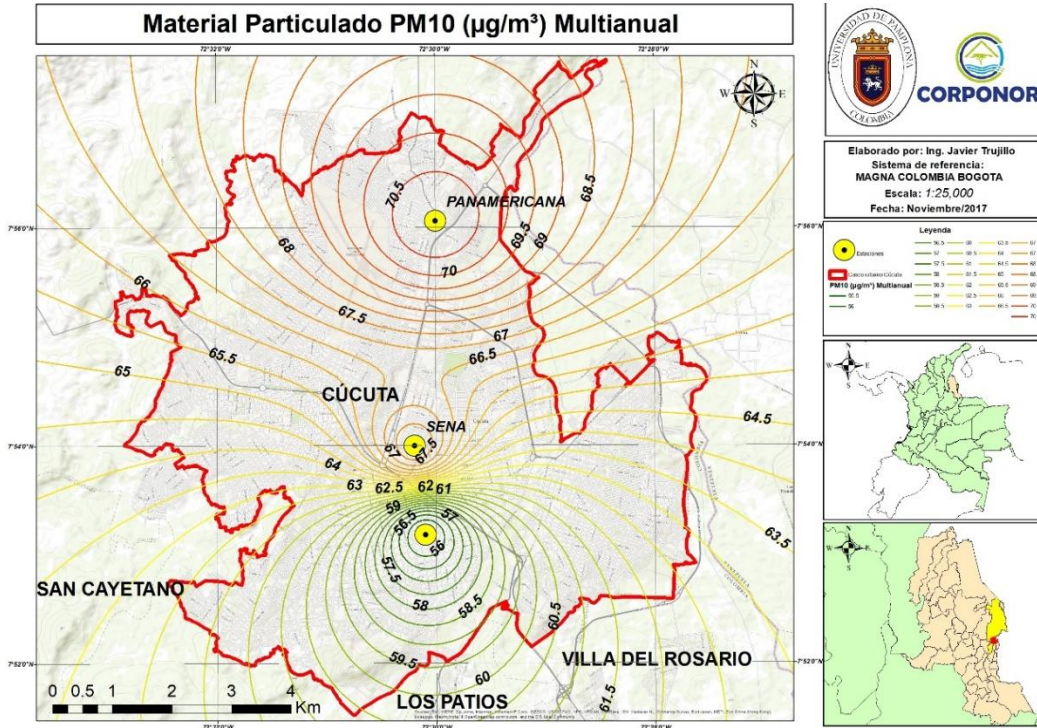
En general, y teniendo en cuenta el análisis espacial presentado anteriormente, se infiere que, a lo largo del periodo analizado, los valores máximos de PM<sub>10</sub> se han presentado en la estación Panamericana, los intermedios en Sena y los menores en Cinera, de acuerdo al aumento del flujo vehicular y transporte aéreo, la actividad industrial y la influencia de las variables meteorológicas.



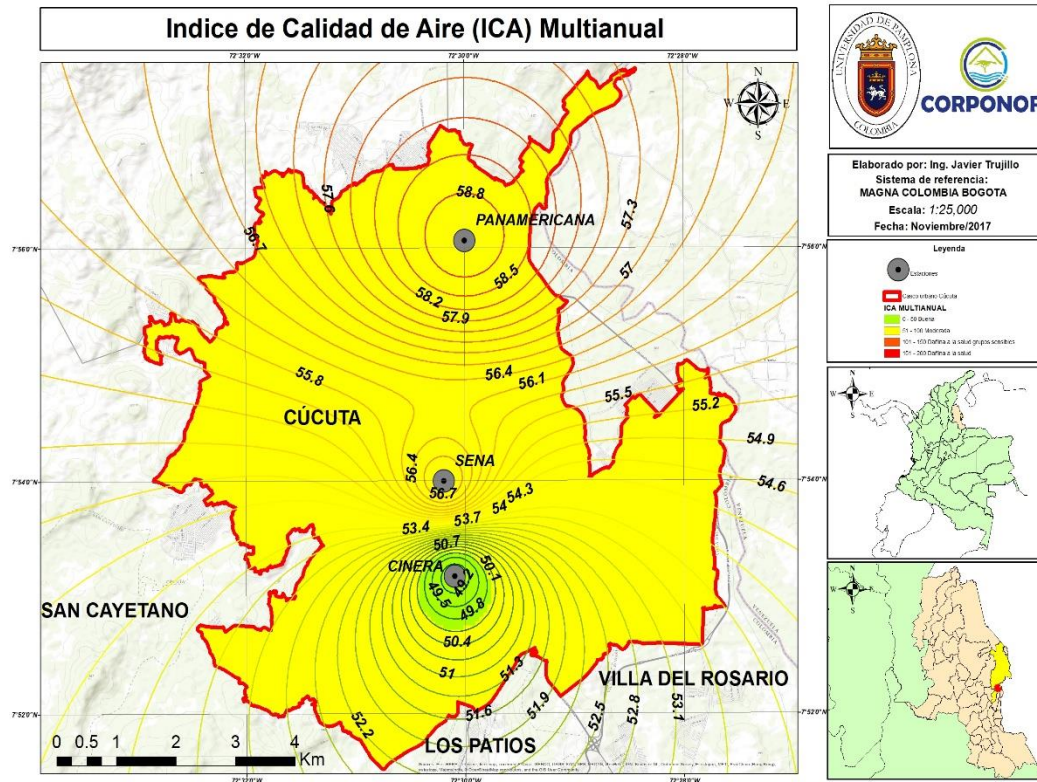
# DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



**Figura 58** Material Particulado PM<sub>10</sub> Multianual



**Figura 57** Índice de Calidad del Aire Multianual





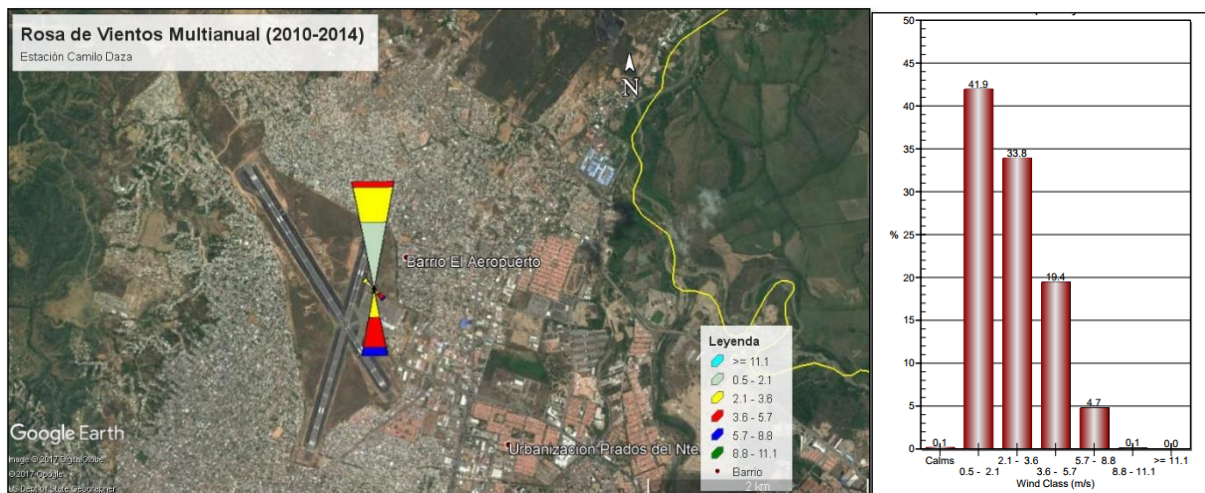
## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



La figura 59 representa la distribución espacial del Índice de Calidad de Aire para el periodo de muestreo. En el caso de la estación Cinera, la calidad del aire se clasifica como “Buena”, representada por el color verde (0-50) y que no representa ningún tipo de peligro o afectación a la salud humana. En las estaciones Sena y Panamericana la calidad del aire se clasifica como “Moderada”, rango entre 51-100 y que, de acuerdo a la magnitud del valor del ICA en este rango, pueden presentarse posibles síntomas respiratorios en individuos no sensibles y un posible agravamiento de enfermedad del corazón o del pulmón en personas con enfermedades cardiopulmonares y adultos mayores.

La rosa de vientos multianual (figura 60) presenta mayor tendencia en la dirección Norte, con mayor frecuencia en la velocidad de vientos en los rangos entre 0.5 y 2.1 m/s. cabe mencionar que el periodo comprendido para la realización de la rosa de vientos es 2010-2014, debido a la disponibilidad de datos por parte del IDEAM, correspondiente a la estación Camilo Daza

**Figura 59** Rosa de Vientos e Histograma de frecuencias Multianual (2010-2014)



Fuente: Trujillo, J (2017)



## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



### 13.5 DETERMINACIÓN DE METALES PESADOS

Los principales elementos encontrados por la quema de combustibles fósiles, transformación de metales e incineración de residuos son el Pb, Cd, Zn, Cu, Ni, Sb (Gao et al., 2002). Los diferentes elementos presentes en las muestras del material particulado pueden estar asociados con materia mineral, aerosol marino, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno y compuestos de carbono (Viana, 2003; Viana, Querol & Alastuey, 2006).

En este apartado se muestran los resultados referentes a la identificación y determinación de los metales pesados presentes en el material particulado PM<sub>10</sub> registrado en las estaciones de muestreo de la red de calidad del aire del municipio de Cúcuta, durante el muestreo del mes de noviembre de 2015. Los resultados se obtuvieron de acuerdo a la metodología planteada en el apartado 12.3. Así mismo se presenta el análisis espacial de los metales pesados identificados, aplicando Sistemas de Información Geográfica (ArcGis).

#### 13.5.1 Longitud de Onda

Cada metal pesado que se identifica por medio de la espectrometría de absorción atómica es determinado a una longitud de onda específica. En la Tabla 12 y Figura 61 se especifica la longitud de onda a la que se determinaron los metales pesados presentes en las muestras de PM<sub>10</sub>.

**Tabla 12** Longitud de Onda para la determinación de Metales Pesados

METALES PESADOS	LONGITUD DE ONDA (nm)
Pb	283.3
Zn	213.9
Mn	279.5
Cu	324.8
Cd	228.8
Cr	357.9

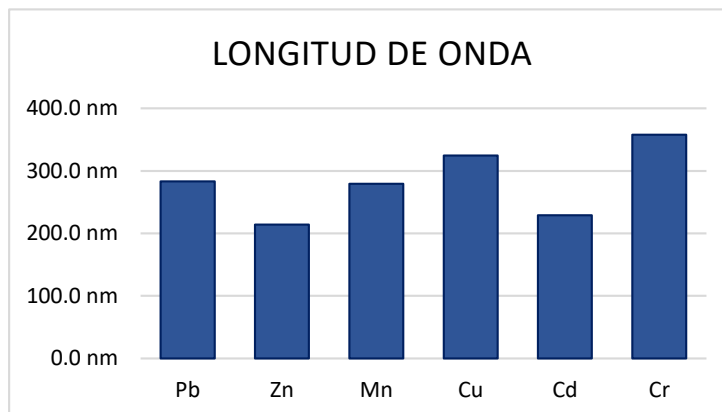
Como se observa en la Tabla 12 y la Figura 61, el metal que se determina a una mayor longitud de onda es el Cromo, seguido del Cobre y, por último, el Zinc; esto debido a las especificaciones de la técnica de espectrometría de absorción atómica.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 60** Longitud de Onda para la determinación de Metales Pesados



Fuente: Trujillo, J (2017)

### 13.5.2 Concentraciones de Metales Pesados ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Se evaluaron las concentraciones de Plomo, Zinc, Manganeso, Cobre, Cadmio y Cromo en las tres estaciones de monitoreo de calidad del aire en el municipio de Cúcuta, durante el mes de noviembre de 2015, cuyos valores en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  se presentan en la Tabla 13 y figura 62.

**Tabla 13** Concentraciones de metales pesados determinados

ESTACIONES	Concentraciones de metales pesados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
	Pb	Zn	Mn	Cu	Cr
<b>CINERA</b>	0.000512	0.002807	0.000560	0.002734	0.001463
<b>SENA</b>	0.000403	0.003916	0.001915	0.020288	0.000864
<b>PANAMERICANA</b>	0.000621	0.007369	0.005872	0.088505	0.003257

Fuente: Trujillo, J (2017)

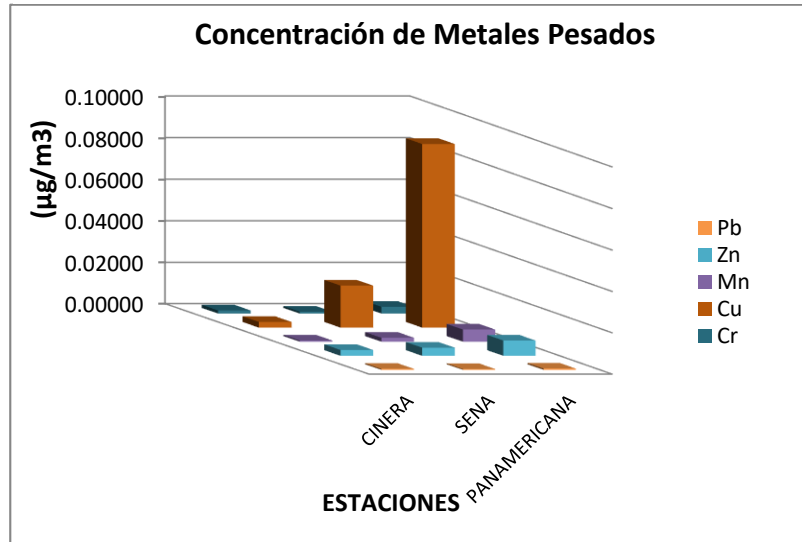
Se observa que las mayores concentraciones de metales, corresponden a cobre en la estación Panamericana, debido principalmente a su ubicación en una zona industrial y por la presencia de este metal en la utilización de combustibles fósiles para la actividad vehicular (fuentes móviles). El zinc es el segundo metal con mayores concentraciones identificadas en las tres estaciones. Las menores concentraciones de metales corresponden a Plomo en las tres estaciones, puesto que su presencia en combustibles fósiles como la gasolina ha disminuido, de acuerdo a lo establecido por el gobierno en cuanto a la circulación de gasolina plomada. (Ver Tabla 13 y Figura 62)



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 61** Concentración de Metales Pesados en muestras de PM<sub>10</sub>

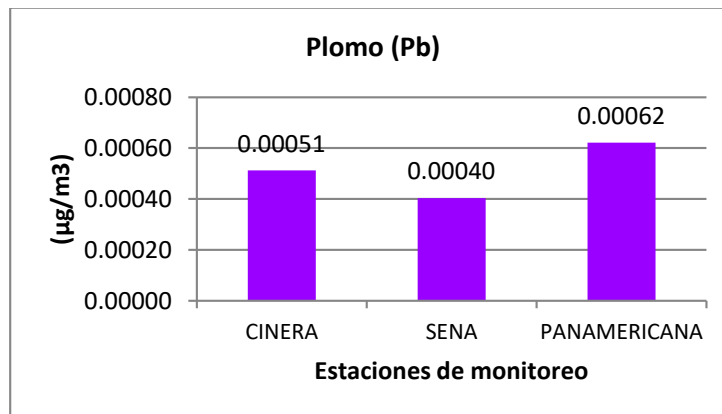


Fuente: Trujillo, J (2017)

A continuación, se presentan las concentraciones determinadas de cada contaminante y su representación espacial en SIG (ArcGis). Cabe resaltar que el espectrofotómetro de absorción atómica no detectó trazas de Cadmio en las muestras analizadas de material particulado PM<sub>10</sub>.

En la figura 63 se presentan las concentraciones de Plomo determinadas por la técnica EAA y su representación espacial se muestra en la Figura 64.

**Figura 62** Concentración de Plomo (Pb) µg/m<sup>3</sup>

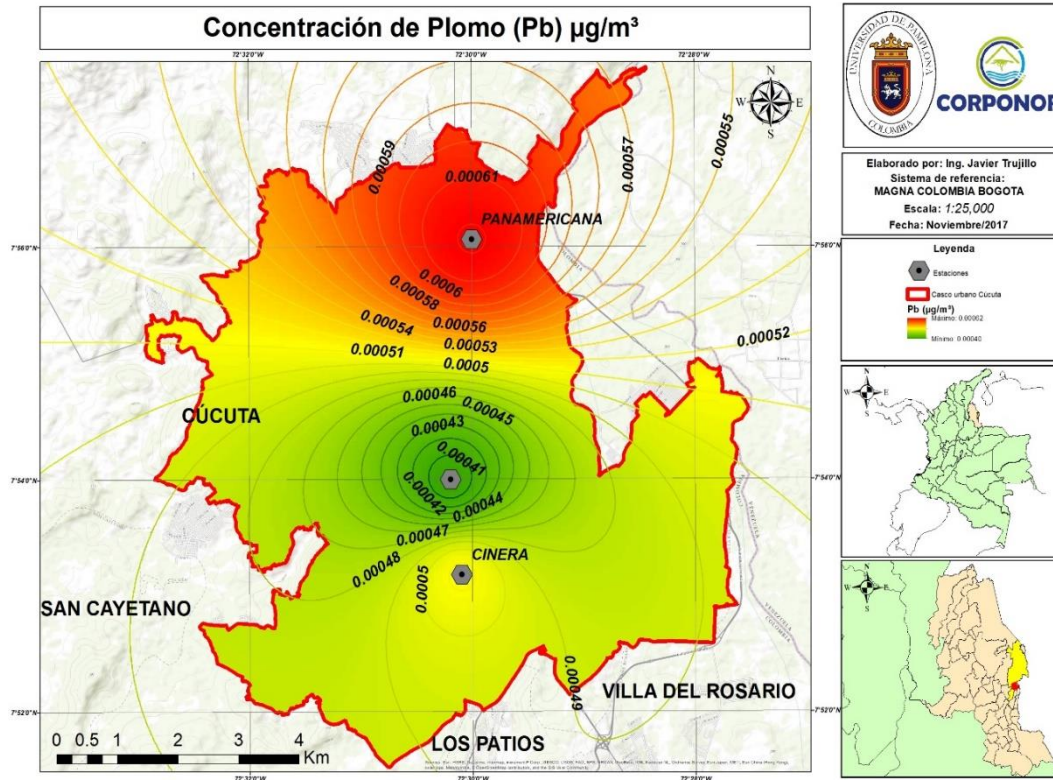




## DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 63 Distribución espacial del Plomo



Se observa que las máximas concentraciones de Plomo se presentan en la estación Panamericana, seguido de Sena. En la estación Cinera se determinaron las menores concentraciones; todo esto debido a la influencia de factores anteriormente descritos y a las concentraciones de PM<sub>10</sub> registradas en cada estación. A pesar de esto, las concentraciones de Plomo son muy bajas, y no representan mayores afectaciones a la salud y al ambiente.

En la figura 65 se presentan las concentraciones de Zinc determinadas por la técnica EAA y su representación espacial se muestra en la Figura 66.

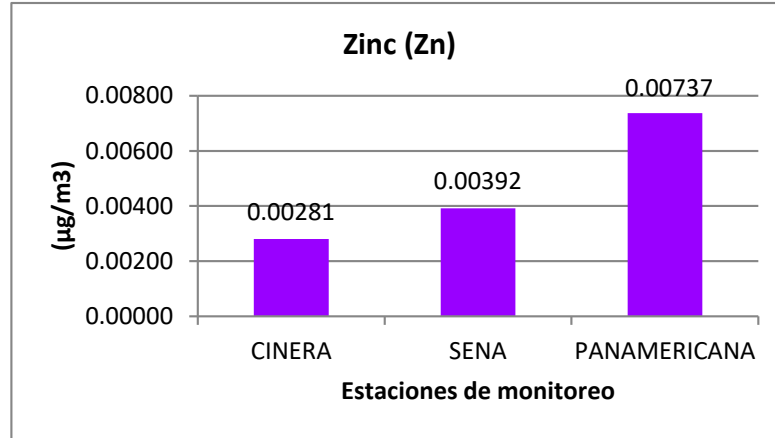
Al igual que en el caso del Plomo, las máximas concentraciones de Zinc se presentan en la estación Panamericana y las menores en Cinera. Teniendo en cuenta que la mayor actividad industrial se realiza en los alrededores de la estación Panamericana, las personas que trabajan diariamente en esta zona, en actividades como construcción y mecánicos de automóviles pueden verse expuestos a la contaminación por Zinc. Es importante mencionar que la concentración promedio de Zinc durante un periodo de un año en un área cerca de una fuente industrial puede llegar a los 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (ATSDR, 2003).



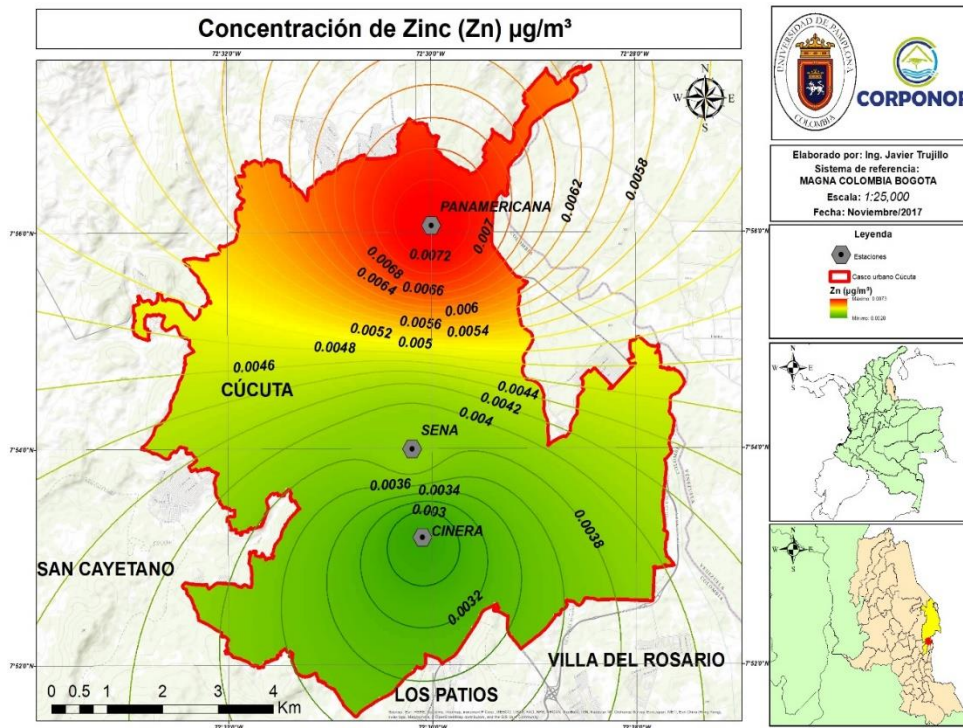
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 64** Concentración de Zinc (Zn) µg/m<sup>3</sup>



**Figura 65** Distribución espacial del Zinc



Fuente: Trujillo, J (2017)

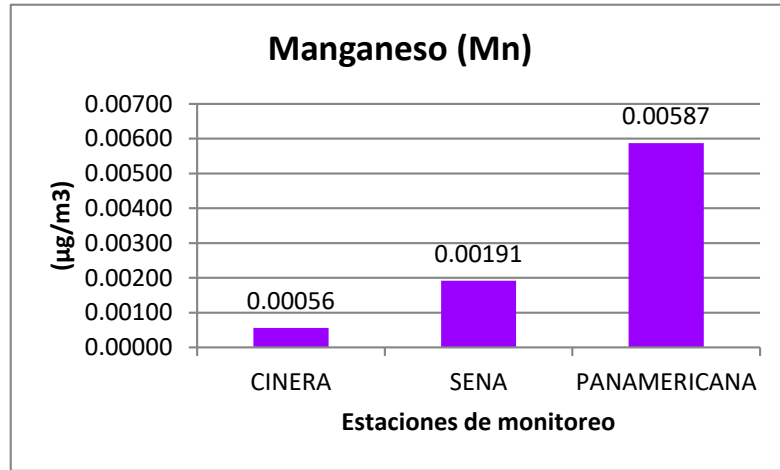
En la figura 67 se presentan las concentraciones de Manganeso determinadas por la técnica EAA y su representación espacial se muestra en la Figura 68.



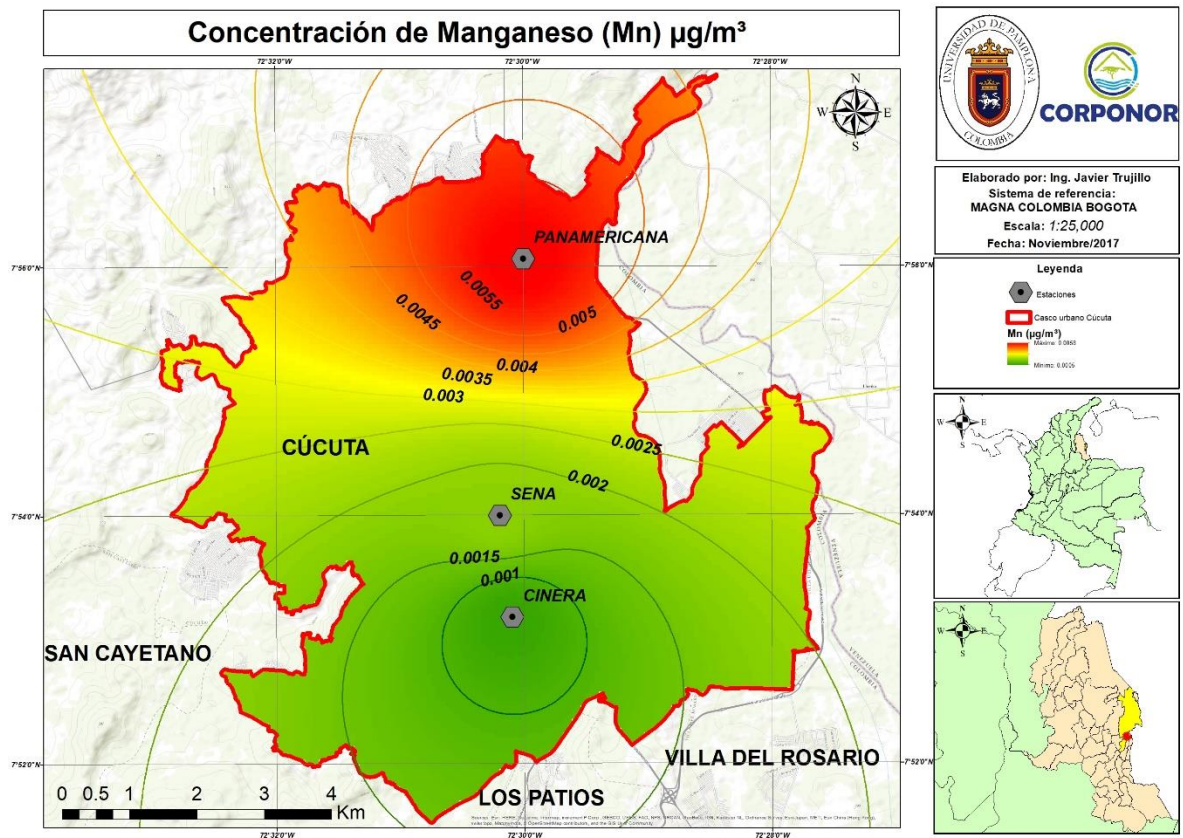
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 66** Concentración de Manganeso (Mn)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



**Figura 67** Distribución espacial del Manganeso



Fuente: Trujillo, J (2017)

En general, las mayores concentraciones se presentan en Panamericana, seguido de Sena y finalmente Cinera, aunque las concentraciones determinadas de este



## DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



metal son muy mínimas. Las concentraciones relativamente altas en Panamericana pueden estar asociadas a la contaminación por flujo vehicular y aéreo en los alrededores de la estación.

En la figura 69 se presentan las concentraciones de Cobre determinadas por la técnica EAA y su representación espacial se muestra en la Figura 70.

Figura 68 Concentración de Cobre (Cu)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

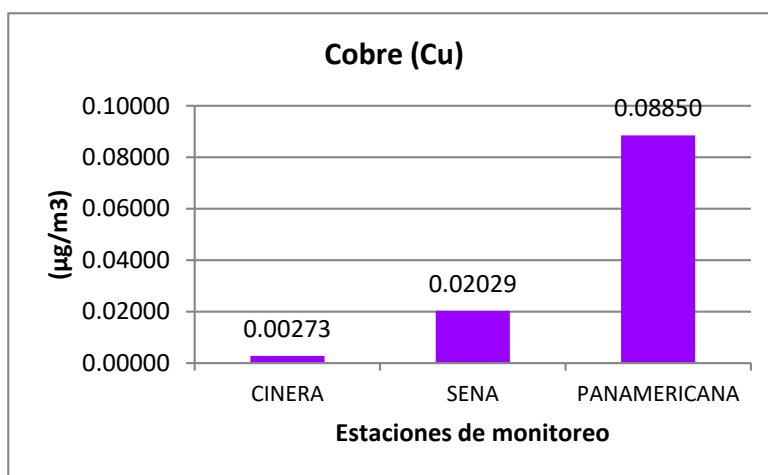
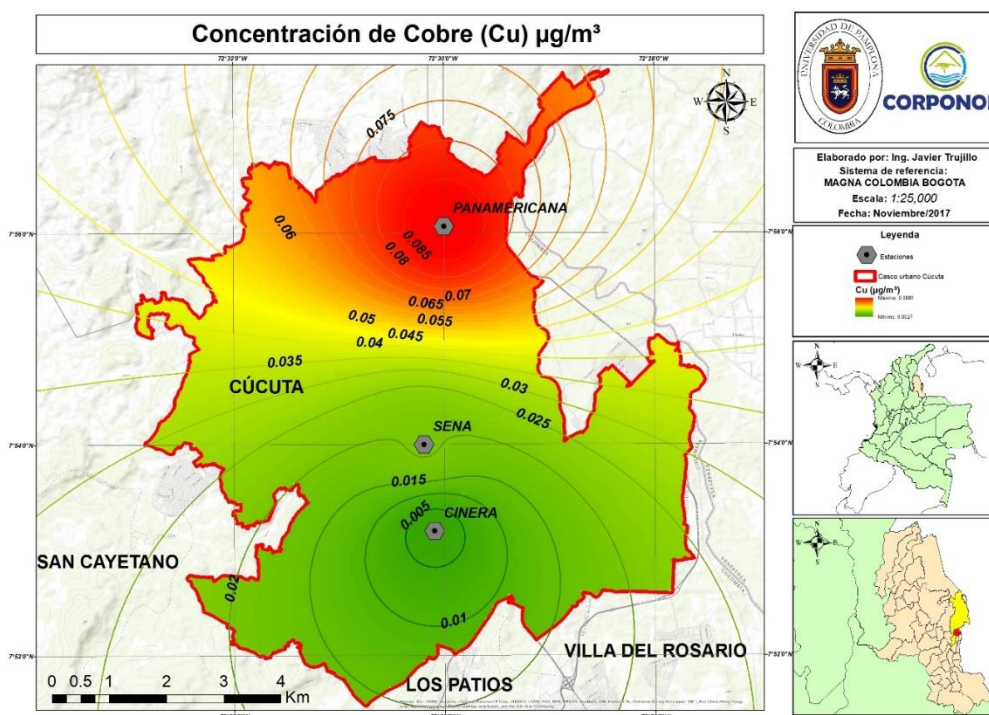


Figura 69 Distribución espacial del Cobre





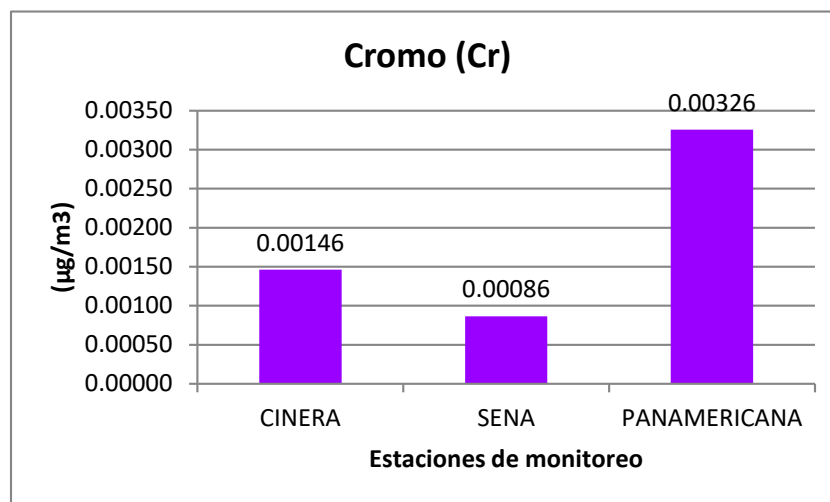
**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



En el caso del Cobre, los valores máximos se detectaron en la estación Panamericana y unas muy bajas concentraciones en Cinera. La contaminación por Cobre está asociada a las emisiones por actividades industriales como la producción de pinturas y barnices, y en la fundición de acero, cobre y zinc por la utilización de algunos combustibles fósiles para el tránsito de vehículos.

En la figura 71 se presentan las concentraciones de Cromo determinadas por la técnica EAA y su representación espacial se muestra en la Figura 72.

**Figura 70** Concentración de Cromo (Cr)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$



Fuente: Trujillo, J (2017)

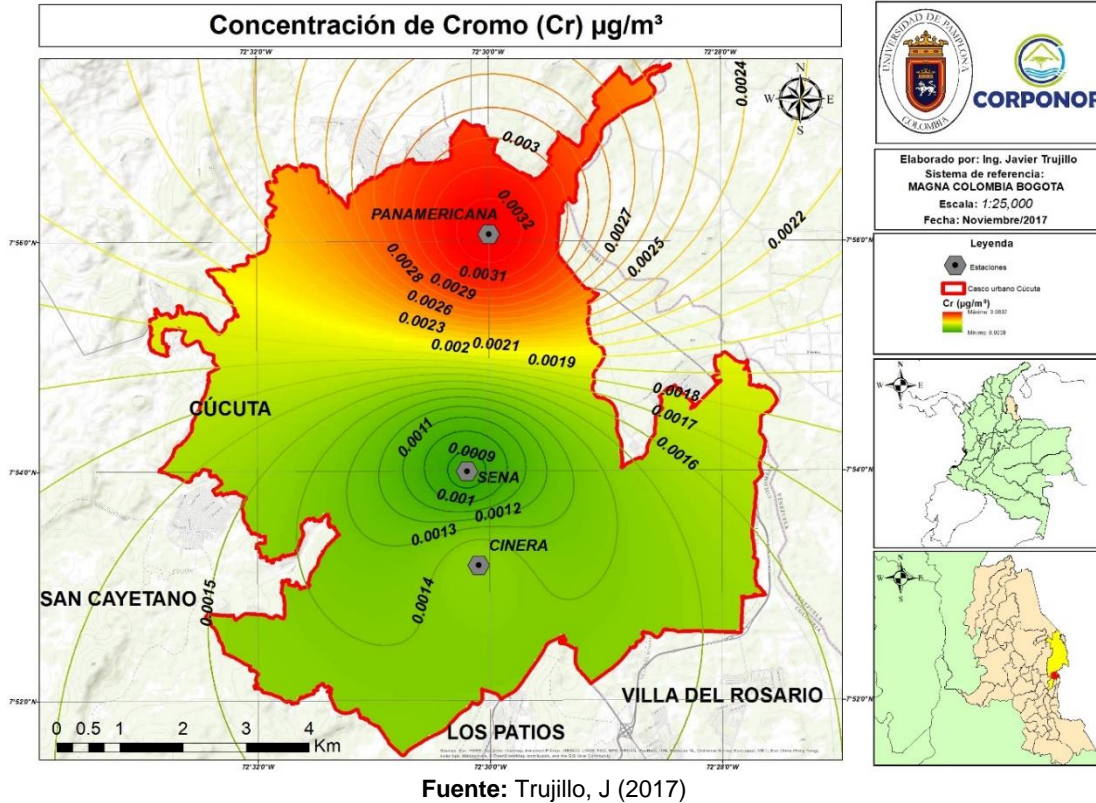
Respecto al Cromo, se observa que las concentraciones son mayores en la estación Panamericana. Sin embargo, se presenta un aumento en las concentraciones detectadas en Cinera. La contaminación por Cromo está asociada a los compuestos de cromo usados en procesos de manufactura de tinturas y pigmentos, preservación de cuero y madera. Además, el cromo hexavalente se presenta en los sistemas de refrigeración industrial como en refinerías de petróleo, plantas fabricadoras de químicos y procesadoras de metales primarios. El Departamento Administrativo de Medio Ambiente (DAMA, 2003) establece una concentración promedio a condiciones normales de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para este metal. Según la organización Mundial de la Salud en Europa se reporta un promedio de cromo en el aire en áreas urbanas  $4 - 70 \text{ ng}/\text{m}^3$ .



# DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.



Figura 71 Distribución espacial del Cromo



Fuente: Trujillo, J (2017)

Por último, en la Figura 73 se presenta la comparación entre las concentraciones determinadas de los metales pesados Pb, Zn, Mn, Cu y Cr y las concentraciones de material particulado PM<sub>10</sub>, registrado en las estaciones de monitoreo para el mes de noviembre de 2015.

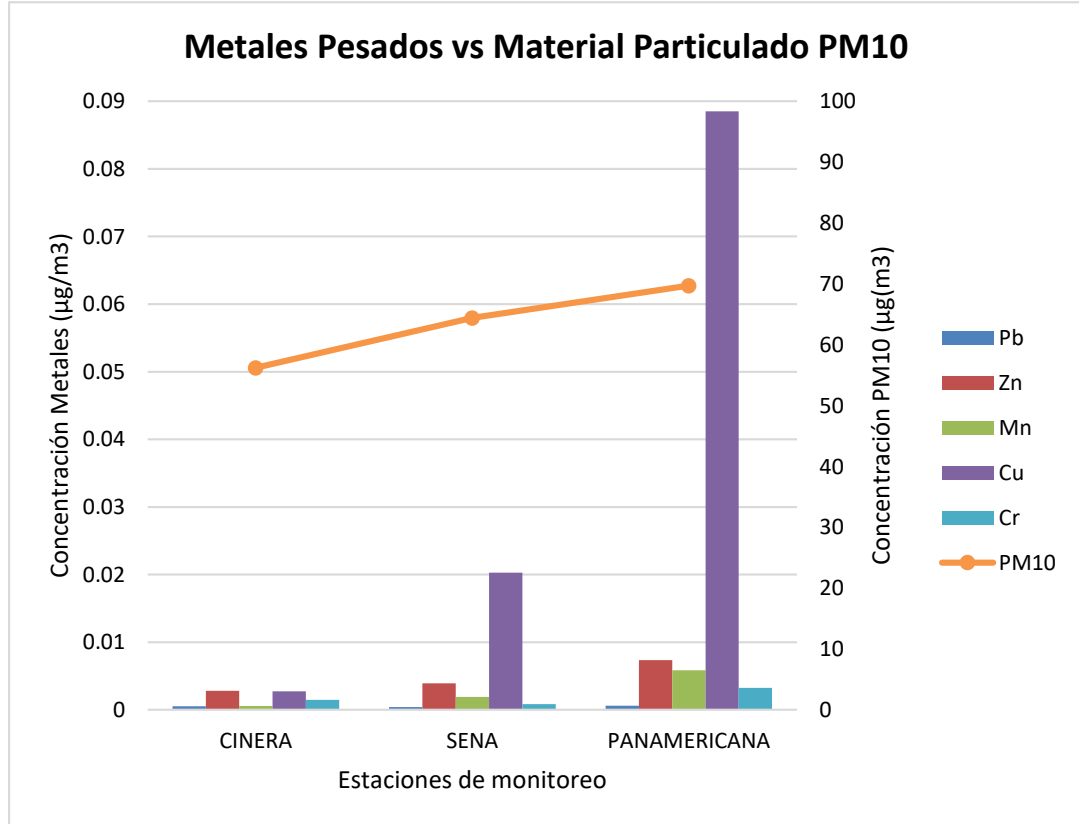
Se observa que se mantiene una relación directamente proporcional entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y las determinadas para los metales Cobre, Zinc y Manganeso, mientras que el Cromo no mantiene esta tendencia. Por otra parte, las concentraciones de Plomo son muy mínimas en comparación con los demás metales detectados, por tanto, su presencia en las muestras de PM<sub>10</sub> no es mayormente significativa. Cabe agregar que, en todos los casos, las mayores concentraciones de cada metal se presentan en la estación Panamericana, al igual que las de PM<sub>10</sub>, debido a condiciones y factores mencionados a lo largo de esta investigación.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



**Figura 72 Metales Pesados vs Material Particulado PM<sub>10</sub>, noviembre de 2015**



Fuente: Trujillo, J (2017)



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## 14. CONCLUSIONES

Se estableció la base de datos de calidad del aire por material particulado PM<sub>10</sub> y variables meteorológicas correspondiente al periodo de muestreo de 2010 – 2016 con los datos disponibles, aplicando procesos de validación que permitan obtener mayor certeza en los datos y garanticen los resultados.

En el periodo comprendido entre 2011 y 2012, se observa la poca variación en el número de muestras registradas por las tres estaciones de monitoreo. Sin embargo, la cantidad de muestras registradas en este año es aproximadamente la mitad de las muestras mínimas anuales (50 % de significancia de las muestras). Por otra parte, el número de muestras registradas en el 2012 presentan la mayor discrepancia con respecto al número de muestras mínimas anuales, lo que indica que no son significativas para los posteriores análisis a realizar, por la escasez de muestras.

Las estaciones Cinera, Sena y Panamericana presentan relación inversa con las variables brillo solar, evaporación, temperatura y velocidad del viento; y relación directa con la humedad relativa y la precipitación. Es imperativo aclarar que no presentan una correlación relevante, en por esto que se puede mencionar que las variables meteorológicas no presentaron mayor influencia en el comportamiento del material particulado PM<sub>10</sub> en ninguna de las 3 estaciones de la Red de Calidad de Aire de Corponor.

El mayor episodio de contaminación por PM<sub>10</sub> se presentó en la estación SENA el 22 de abril de 2010 alcanzado una concentración de 154.6 µg/m<sup>3</sup>. Además, se observó que los días previos a este episodio se registraron valores cercanos, no obstante, el episodio no alcanza el estado excepcional mínimo de prevención según la resolución 610 de 2010.

Las tres estaciones de monitoreo exceden con el límite anual permisible de PM<sub>10</sub> (20 µg/m<sup>3</sup>) estipulado por la OMS, la cual es más exigente a comparación con las otras normativas debido a los efectos en la salud que se pueden presentar por exposición prolongada al contaminante. Por otra parte, los valores registrados por las tres estaciones no cumplen con la normativa colombiana y la EPA, presentándose en su mayoría, valores por encima de 50 µg/m<sup>3</sup>.

Los mapas de concentración de material particulado PM<sub>10</sub> evidencian un incremento de las partículas en la estación Panamericano con concentraciones promedios que oscilan entre 70 µg/m<sup>3</sup> y 80 µg/m<sup>3</sup>, por otro parte, la estación Cinera presenta



**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



concentraciones mínimas con promedios que oscilan entre 50 µg/m<sup>3</sup> a 60 µg/m<sup>3</sup>, estratificando la ciudad de Cúcuta en dos zonas:

Zona Norte: presenta mayor concentración de material particulado PM<sub>10</sub>.

Zona Sur: presenta menor concentración de material particulado PM<sub>10</sub>.

Se presentó un aumento del material particulado PM<sub>10</sub> para los meses de febrero, marzo, mayo, julio y agosto, principalmente en las estaciones Sena y Panamericana, las cuales están ubicadas en áreas industriales; mientras que en los meses enero, abril, junio, septiembre, octubre, noviembre y diciembre se observa una disminución en las concentraciones, indicando que son transportadas y depositadas en lugares lejanos del municipio. La estación Cinera, que se ubica principalmente en el centro del municipio registra los valores mensuales más bajos, en comparación con Sena y Panamericana; sin embargo, para el mes de agosto se registró un valor relativamente alto, debido a la influencia de variables meteorológicas como velocidad del viento, que arrastran las partículas y las depositan en zonas residenciales, induciendo a posibles focos de contaminación.

En el periodo comprendido entre 2010 – 2016 se evidencia un índice de calidad de aire moderado según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) con valores cercanos a 50, es decir, se aproximan a la clasificación de buena calidad del aire en el municipio de San José de Cúcuta, a excepción del área aferente a la estación Cinera que presenta calidad de aire buena en los años 2010 y 2011.

En la estación Cinera el Índice de Calidad del Aire de los meses marzo, abril, mayo y junio, indica una clasificación “Buena”, mientras que en Sena y Panamericana se clasifica como “Moderada”, con valores próximos a 50 y que no se consideran perjudiciales para la salud. Sin embargo, es importante tener presente estos valores, para prevenir posibles exposiciones a concentraciones elevadas de PM<sub>10</sub> en los alrededores de las estaciones de monitoreo y, en general, en el municipio.

La mayor contaminación por material particulado PM<sub>10</sub> y metales pesados Pb, Zn, Mn, Cu y Cr se presenta en la zona de la estación Panamericana, esto puede ser producto de la actividad industrial presente en esa zona, y además del comportamiento del viento que proviene del sur en dirección norte según las rosas de viento atrayendo material particulado y otro tipo de contaminantes.

El Cobre fue el metal que presenta mayor concentración detectándose los valores máximos en la estación Panamericana a diferencia de la estación Cinera que presenta muy bajas concentraciones. La contaminación por Cobre está asociada a las emisiones por actividades industriales como la producción de pinturas y



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



barnices, y en la fundición de acero, cobre y zinc por la utilización de algunos combustibles fósiles para el tránsito de vehículos.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## **15. RECOMENDACIONES**

En primera instancia se recomienda a la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) realizar un seguimiento continuo a las estaciones de la Red de Calidad de Aire en San José de Cúcuta, en diferentes aspectos como la toma de muestras, transporte y almacenamiento de los filtros, la calibración de los equipos Hi-Vol de material particulado PM<sub>10</sub>; y aplicar la validación de los datos, puesto que, generan mayor confiabilidad con respecto a las concentraciones obtenidas.

La determinación de metales pesados fue un estudio preliminar utilizado en un solo mes de muestreo. Es importante continuar con estos análisis continuamente no solo para metales pesados, además de esto es importante tener en cuenta otro tipo de contaminantes que puedan estar presentes en el aire del municipio como lo son los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y estudios microbiológicos.

La distribución de las estaciones de calidad de aire es un factor importante al momento de conocer su comportamiento espacial, por este motivo se recomienda incluir otras dos estaciones en el municipio, una en el sector occidental y la otra en el sector oriental en límites con Venezuela. Lo anterior con la finalidad de conocer la influencia en la contaminación del aire proveniente del país vecino y obtener mayor cobertura de la Red de Calidad e Aire.

Esta investigación establece la calidad del aire de San José de Cúcuta en el período comprendido entre 2010 y 2016, y las zonas que presentan mayor contaminación y riesgo de exposición, por lo tanto, se recomienda a la autoridad ambiental informa a la población en general del municipio para que conozcan la calidad de aire que están respirando.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



## 16. REFERENCIAS

ARCINIEGAS , A. & Rodriguez , E. Estudio de la morbilidad en niños menores a cinco años por enfermedad respiratoria aguda y su relación con la concentración de partículas en la localidad de Puente Aranda en Bogotá. Universidad de la Salle, Bogotá D.C, 2005.

ATSDR. Tox Faqs for heavy metals. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/tfacts13.html>. 2005

BRUNEKREEF, B & HOLGATE, S.T. Air pollution and health. The Lancet, 360 (9341) 1233-1342, 2002.

CANCINO , J. Validación y análisis de la información de la red de calidad del aire de Bogotá. Universidad de los Andes, Bogotá D.C, 2006.

CESEL. Estudio de Impacto Ambiental del Proyecto “Reforzamiento de la Línea de Transmisión Centro Norte Medio en 500 kV” (Línea de Transmisión Eléctrica Zapallal-Trujillo y Subestaciones Asociadas), 2010.

Congreso de Colombia. Ley 23 de 1973. Facultades para expedir el Código Nacional de los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. Colombia, 1973.

CONTRERAS, E. Evaluación de los efectos en salud relacionados con la contaminación del aire para el sector ciudadela norte de la ciudad de Ocaña, norte de Santander. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de ciencias agrarias y del ambiente, ingeniería ambiental, Ocaña, 2015.

Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). Síntesis Ambiental del Norte de Santander. Disponible en: <http://www.corponor.gov.co/formatos/DIC%20SIGESCOR/PUBLICAR%20WEB%20101209/PLAN%20DE%20ACCION%20AJUSTADO%202007%202011/2%20SINTESIS%20AMBIENTAL.pdf>.

DE NEVERS, N. H. Ingeniería de control de la contaminación del aire. México: McGraw – Hill, 1998.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Departamento Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Resolución 1208 de 2003. Bogotá D.C, Colombia, 2003.

ERÓSTEGUI R, C. Contaminación por metales pesados. Revista Científica Ciencia Médica SCEM, Vol.12, N° 1, 2009.

FANG, G., WU, Y., CHANG, S., RAU, J., HUANG, S & LIN, C. Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. Toxicology and Industrial Health, 22, 2-37, 2006.

FINKELMAN, J., COREY, G & CALDERÓN, R. Epidemiología ambiental: un proyecto para América Latina y el Caribe. Organización Panamericana de la Salud, 1994.

FUENZALIDA, M. Evaluación de modelos geo estadísticos aplicados a la exposición al contaminante atmosférico PM10 en Chile. Facultad de Ciencias Espaciales. ResearchGate, 2015.

GAO, Y., NELSON, E.D., FIELD, M.P., DING, Q., Li, H., SHERRELL, R.M., GIGLIOTTI, C.L., VAN RY, D.A., GLENN, T.R., y EISENREICH, S.J. Characterization of atmospheric trace elements on PM2.5 particulate matter over the New York–New Jersey harbor estuary. Atmospheric Environment, 36, 1077-1086, 2002.

GREEN, J. La Calidad del Aire en América Latina: Una visión panorámica. Clean Air Institute. Washington D.C., 2013.

Gutiérrez, G. Capítulo 4. Disponible en: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/gutierrez\\_g\\_go/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/gutierrez_g_go/capitulo4.pdf). 2011.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Tipos y fuentes de contaminantes atmosféricos. Ciudad de México., 2007.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Informe del estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010. Bogota, D.C., 2012.

LARNER, B. Colombia. Cost of Environmental Damage: A socio-economic and Environmental Health Risk Assessment, 2004.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



LONDOÑO, L., CAÑÓN, J., VILLADA, R & LÓPEZ, L. Caracterización espacial de PM10 en la ciudad de Medellín mediante modelos geo estadísticos. Ing. USBMed, Vol. 6, N° 2, 2015.

MACHADO, A., GARCIA, N., GARCIA, C., ACOSTA, L., CORDOVA, A., LINARES, M., GIRALDOTH, D & VELASQUEZ, H. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. Centro de Investigaciones CEDEGAS, Universidad del Zulia, Venezuela, 2008.

MARSHALL, J & NAZAROFF, W. Intake fraction. EEUU, 2006.

MARTÍNEZ A, E & DIAZ, Y. Contaminación Atmosférica. Universidad de Castilla-La Mancha, España., 2014.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 601 de 2006. Norma de Calidad de Aire o Nivel de Inmisión. Bogota D.C, Colombia, 2006.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Principios de Medición de Calidad de Aire (PMCA). Colombia, 2008.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo para el seguimiento y monitoreo de la Calidad del aire. Bogotá D.C, febrero, 2008.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 610 de 2010. Modifica la Resolución 601 de 2006. Bogota D.C., 2010.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 650 de 2010. Adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Colombia, 2010.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Resolución 2154 de 2010. Ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire. Colombia, 2010.

Ministerio de Agricultura y pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Metales Pesados. Gobierno de España. Disponible en: [http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales\\_pesados.aspx](http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx)



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Contaminación Atmosférica. Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Organización Mundial de la Salud (OMS). Calidad del aire (exterior) y salud. Nota Descriptiva N° 313, 2014.

Organización Mundial de la Salud (OMS). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud. Disponible en [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/databases/health\\_impacts/es/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/health_impacts/es/), 2015.

PÉREZ, H., LUNAGÓMEZ, M & ACOSTA, L. Análisis de Partículas Suspendidas Totales (PST) y Partículas Fracción Respirable (PM10), en Cunduacán, Tabasco. Universidad y Ciencia, 26(2): 151-162, 2010.

Presidencia de la Republica. Decreto 02 de 1982. Reglamenta parcialmente la ley 09 de 1979 y el Decreto ley 2811 de 1974 en cuanto a emisiones atmosféricas. Colombia, 1982.

Presidencia de la Republica. Decreto 948 de 1995. Prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad de aire. Colombia, 1995.

PRTR. Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España, 2007.

QUIJANO P, A., QUIJANO V, M & HENAO M, J. Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable 2.5 en Pamplona, Norte de Santander, Colombia. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas, Vol 8, N°1, enero-junio, pp 1-20. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2010.

QUIJANO P, A., THOMAS M, S & Peña R, B. Determinación de Metales y Material Particulado PM 2.5 en muestras del aire de Villa del Rosario – Norte de Santander. Revista de la Facultad de Ciencias Básicas. Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia, 2013.

ROCHA C, E. principios básicos de espectroscopia. Editorial UACH, pág 123-203. México, 2000.



**DETERMINACIÓN DEL INDICE DE CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO (PM<sub>10</sub>) APLICADO AL PERIODO DE MUESTREO 2010-2016 EN EL MUNICIPIO DE SAN JOSÉ DE CÚCUTA, NORTE DE SANTANDER.**



ROJANO, R., ANGULO, L & RESTREPO, G. Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad de Riohacha, Caribe Colombiano. *SciElo*, Vol 24(2), 37-46, 2014.

Tecnología Automotriz Limpia S.A (TALSA). Extractos de la 7a. Conferencia ETH en Combustión Generadora de Nanopartículas, Zurich, agosto, 2003.

VELASCO G, M. La calidad del aire asociado con metales pesados en la ciudad de Manizales. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2005.

VIANA, M. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 2003.

VIANA, M., QUEROI, X., y ALASTUEY, A. Chemical characterisation of PM episodes in NE Spain. *Chemosphere*, 62, 947-956, 2006.

WHO. Guía de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. OMS, 2005.