

**IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE EMISIÓN DE  
MATERIAL PARTICULADO PM2.5 EN UNA ZONA DE ALTO TRÁFICO Y UNA  
ZONA DE BAJO TRÁFICO VEHICULAR EN BUCARAMANGA MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DEL MODELO RECEPTOR-FUENTE CMB**

**JAIVERTH LEANDRO LÓPEZ GONZÁLEZ  
YURLEY TATIANA ZAPATA REY**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2016**

**IDENTIFICACIÓN DE LAS PRINCIPALES FUENTES DE EMISIÓN DE  
MATERIAL PARTICULADO PM2.5 EN UNA ZONA DE ALTO TRÁFICO Y UNA  
ZONA DE BAJO TRÁFICO VEHICULAR EN BUCARAMANGA MEDIANTE LA  
APLICACIÓN DEL MODELO RECEPTOR-FUENTE CMB**

**JAIVERTH LEANDRO LÓPEZ GONZÁLEZ  
YURLEY TATIANA ZAPATA REY**

**Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Ambiental**

**Director  
KENTO TARO MAGARA GÓMEZ, PhD**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA**

**2016**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

FIRMA DEL JURADO

---

FIRMA DEL JURADO

Bucaramanga, Septiembre 15 de 2016

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios.*

*A nuestros padres, por el apoyo incondicional.*

*A nuestros hermanos, por creer siempre en nosotros.*

*A Kento, por guiarnos en este proceso.*

*A todos los que hacen parte de este proyecto, por permitirnos participar.*

*A nuestros amigos, por tantos momentos.*

*A la UPB, por nuestra formación.*

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	15
1.OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2. ANTECEDENTES.....	19
3. MARCO TEÓRICO. ....	22
3.1 MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO. ....	22
3.1.1 Tamaño del material particulado.....	23
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONTAMINANTE .....	23
3.2.1. Materia mineral. ....	23
3.2.2. Compuestos de carbono.....	24
3.2.3. Compuestos de azufre.....	25
3.2.4. Compuestos de nitrógeno.....	26
3.2.5 Metales pesados.....	27
3.3 FUENTES QUE APORTAN EL MATERIAL PARTICULADO.....	27
3.3.1. Fuentes fijas.....	27
3.3.2. Fuente fija dispersa o difusa. ....	28
3.4. IMPACTO SOBRE LA SALUD Y EL AMBIENTE DEBIDO A LA EXPOSICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5. ....	29
3.5. MODELOS DE RECEPTORES .....	30
3.5.1 CMB.....	31
3.5.2 UNMIX. ....	32
3.5.3 PMF. ....	33
3.6 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	33
4. METODOLOGÍA .....	37

4.1. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN FISICOQUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 GENERADO EN LA ZONA DE ALTO TRÁFICO VEHICULAR DURANTE QUINCE MESES Y EN LA ZONA DE BAJO TRÁFICO VEHICULAR DURANTE NUEVE MESES. ....	37
4.1.1. Selección de los puntos de muestreo. ....	37
4.1.2. Caracterización del material particulado PM2.5.....	41
4.2 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA COMPOSICIÓN DEL PM2.5 EN LAS ZONAS DE ESTUDIO. ....	43
4.2.1 Relación entre las concentraciones de PM2.5 y el flujo vehicular.....	43
4.2.2 Variación temporal y espacial de la composición fisicoquímica de las muestras. ....	44
4.2.3 Análisis de las condiciones meteorológicas durante el periodo de muestreo. ....	44
4.2.4 Identificación de posibles alteraciones en las condiciones del ambiente. ....	44
4.3 CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE LAS FUENTES DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 EN LAS ZONAS DE INFLUENCIA AL PUNTO DE MUESTREO POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DEL MODELO CMB.....	44
4.3.1 Aplicación del modelo. ....	45
4.3.3Correlación de los resultados con la bibliografía pertinente.....	46
4.3.4 Correlación de las fuentes identificadas por el modelo de receptores con las emisiones en el punto de muestreo. ....	46
5. RESULTADOS.....	47
5.1 INVENTARIO DE FUENTES .....	47
5.1.1 Conteo de fuentes móviles.....	47
5.1.2 Identificación de fuentes fijas. ....	49
5.1.3 episodios no frecuentes de generación de pm2.5.....	49
5.2 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5.....	50
5.3 RELACIÓN ENTRE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y LAS CONCENTRACIONES DE PM2.5 .....	55
5.4 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL PM2.5 .....	64

5.5 RESULTADOS MODELO DE CORRELACIÓN DE FUENTES CMB .....	78
5.6 CORRELACIÓN DEL APORTE DE LAS PRINCIPALES FUENTES CON LA COMPOSICIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS .....	82
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:.....	89
6.1 CONCLUSIONES .....	89
6.2 RECOMENDACIONES.....	90
BIBLIOGRAFÍA.....	91
ANEXOS.....	102

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Ubicación punto de muestreo, estación Tránsito .....	39
Figura 2. Punto de muestreo, estación Tránsito .....	39
Figura 3. Ubicación punto de muestreo, Barrio La Joya .....	40
Figura 4. Punto de muestreo, Barrio La Joya .....	41

## LISTA DE GRÁFICAS

	<b>Pág.</b>
Gráfica 1. Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, estación Tránsito .....	51
Gráfica 2. Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, Barrio La Joya .....	52
Gráfica 3. Comportamiento en la distribución de PM2.5 para la estación de Tránsito y el Barrio la joya .....	53
Gráfica 4. Variación espacial y temporal de las concentraciones de PM2.5, estación de Tránsito y Barrio la Joya .....	54
Gráfica 5. Rosa de vientos Barrio Real de Minas, Bucaramanga, Santander, Colombia, octubre 2014 - marzo 2016.....	57
Gráfica 6. Distribución de frecuencia de vientos Barrio Real de Minas, Bucaramanga, Santander, Colombia, octubre 2014 - marzo 2016. ....	58
Gráfica 7. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y velocidad del viento (m/s) estación Tránsito y Barrio la joya .....	59
Gráfica 8. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y precipitación (mm), estación Tránsito y Barrio La Joya .....	60
Gráfica 9. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y humedad relativa (%), estación Tránsito y Barrio la joya .....	62
Gráfica 10. Variación de la composición (%p/p) de PM2.5, estación Tránsito. ....	64
Gráfica 11 Composición ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, estación Tránsito.....	65
Gráfica 12. Variación de la composición (%p/p) PM2.5, Barrio la Joya .....	66
Gráfica 13 Composición ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, Barrio la Joya .....	67
Gráfica 14. Composición porcentual promedio, estación Tránsito y Barrio la Joya	68
Gráfica 15 Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) elementos mayoritarios en PM2.5 estación Tránsito y Barrio La Joya. ....	70
Gráfica 16. Composición (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5, estación Tránsito .....	71

Gráfica 17. Composición (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5, Barrio la Joya .....	72
Gráfica 18. Composición promedio (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5 estación Tránsito, Barrio la Joya.....	72
Gráfica 19. Concentraciones de BC y TOC en PM2.5, estación Tránsito .....	74
Gráfica 20. Concentraciones de BC y TOC, Barrio La Joya .....	75
Gráfica 21. Concentración promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) BC y TOC presentes en PM2.5 estación tránsito, Barrio la Joya .....	76
Gráfica 22. Composición promedio (%p/p) principales metales presentes en PM2.5, estación Tránsito, Barrio La Joya. ....	77
Gráfica 23. Aporte ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de fuentes identificadas, estación Tránsito .....	78
Gráfica 24. Aporte ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de fuentes identificadas, Barrio la Joya .....	79
Gráfica 25. Aporte porcentual promedio de las fuentes identificadas, estación Tránsito y Barrio la Joya. ....	80
Gráfica 26. Aporte porcentual promedio de las cinco principales fuentes identificadas, estación Tránsito y Barrio la Joya .....	81
Gráfica 27. Aporte porcentual promedio de todas las fuentes relacionadas con el flujo vehicular, estación Tránsito y Barrio la Joya. ....	82
Gráfica 28. Relación entre el aporte de PM2.5 por el transporte y las concentraciones de TOC y metales en las muestras (escala arbitraria) .....	83
Gráfica 29. Relación entre el aporte de PM2.5 por la combustión de gasolina y las concentraciones de TOC y metales en las muestras (escala arbitraria) .....	84
Gráfica 30. Relación entre el aporte de PM2.5 por la combustión de diésel y las concentraciones de BC en las muestras (escala arbitraria) .....	85
Gráfica 31. Relación entre el aporte de PM2.5 por compuestos de la corteza terrestre y las concentraciones de metales en las muestras (escala arbitraria).....	86

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Inventario de fuentes móviles intersección carrera 17 con diagonal 15 (estación Tránsito) .....	47
Tabla 2. Inventario de fuentes móviles Barrio La joya .....	48
Tabla 3. Concentración mensual promedio de PM2.5 y flujo vehicular mensual promedio, estación Tránsito y Barrio la Joya .....	49
Tabla 4. Episodios no frecuentes de generación de pm2.5 durante el periodo de muestreo.....	49
Tabla 5. Valores de concentración de PM2.5 medidos estación Tránsito y barrio La Joya, norma Colombiana Y OMS.....	55
Tabla 6. Dirección y velocidad del viento durante cada periodo de muestreo .....	56
Tabla 7. Variables meteorológicas promedio en cada periodo de muestreo .....	57
Tabla 8. Correlación de los resultados con la bibliografía pertinente.....	87

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Distribución de muestras compuestas .....	103
ANEXO B. Resultados de la caracterización fisicoquímica.....	105
ANEXO C. Código de fuentes usadas en el modelo CMB.....	109
ANEXO D. Resultados modelo CMB .....	112

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** Identificación de las principales fuentes de material particulado pm2.5 en una zona de alto tráfico y una zona de bajo tráfico vehicular en Bucaramanga mediante la aplicación del modelo receptor-fuente CMB

**AUTOR(ES):** Jaiverth Leandro López González  
Yurley Tatiana Zapata Rey

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR(A):** Kento Taro Magara Gómez

### RESUMEN

Con el propósito de identificar las principales fuentes de emisión de PM2.5 en dos zonas de la ciudad de Bucaramanga, una de alto y otra de bajo tráfico vehicular, se tomaron muestras de PM2.5 en la estación Tránsito y el barrio La Joya, durante 15 y 9 meses respectivamente, a las que posteriormente se les realizó un análisis fisicoquímico con el fin de determinar su composición, además de hacer uso del modelo de receptor-fuente Chemical Mass Balance (CMB) que permite identificar las principales fuentes de emisión de material particulado. La caracterización fisicoquímica dio como resultado que las principales especies presentes en el PM2.5 fueron carbono elemental (medido como BC), carbono orgánico (OC), iones sulfato, amonio y nitrato, y los elementos azufre (S), hierro (Fe) y potasio (K), posteriormente la aplicación del modelo CMB dio como resultado que las principales fuentes de emisión de PM2.5 fueron el parque automotor con más de un 85% de incidencia, representado por fuentes específicas como la combustión de motores de gasolina con un 39% para la estación de Tránsito y un 44% para el barrio La Joya, seguido por la combustión de motores diésel con 26 y 23% respectivamente.

### PALABRAS CLAVES:

Material particulado fino, Caracterización de especies, modelo receptor-fuente.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** Identification of the main sources of particulate matter PM2.5 in a high traffic area and an area of low vehicular traffic in Bucaramanga by applying receptor-source model CMB

**AUTHOR(S):** Jaiverth Lenadro López González  
Yurley Tatiana Zapata Rey

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR:** Kento Taro Magara Gómez

### **ABSTRACT**

In order to identify the main emission sources of PM2.5 in an area with heavy traffic and one with low traffic in the city Bucaramanga, PM2.5 samples were collected during almost one year in both sites. These samples were analyzed to determine carbonaceous content (as black carbon and total organic carbon), ionic species and trace elements. Predominant species found in PM were BC, TOC, sulfate, ammonium and nitrate ions, and sulfur, iron and potassium elements. Based on the composition profile of PM for samples collected in each site, Chemical Mass Balance (CMB) source apportionment model was applied in order to find the most influential sources of PM2.5. Results showed gasoline engine combustion as the main source with a contribution of 39% for the Transito site and 44% for the La Joya site, followed by diesel engine combustion with a contribution of 26 and 23% respectively for both sites.

### **KEYWORDS:**

particulate matter 2.5, characterization of species, receptor-source model.

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en Colombia en los últimos años ha sido un tema de gran preocupación, no solo por los impactos generados en la salud y el ambiente, sino porque además es una de las problemáticas que genera mayores costos ambientales después de la contaminación del agua y los desastres naturales (CONPES 3344 2005). El considerable incremento de la contaminación en el aire está sujeto al desarrollo de la industria y el aumento del parque automotor. Varias ciudades de Colombia, incluyendo Bucaramanga, se ven afectadas por este problema, que se refleja en un descenso de la calidad de vida.

El material particulado (PM) es uno de los contaminantes atmosféricos monitoreados de mayor interés, ya que diversos estudios han demostrado su impacto sobre la salud, este se encuentra como partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas; y se dividen en dos grandes grupos, como son fracción gruesa y fracción fina, de acuerdo a su diámetro aerodinámico (Reist 1993). La fracción gruesa (PM10) comprende partículas de diámetros entre 2,5 y 10  $\mu\text{m}$ , estas partículas pueden entrar al tracto respiratorio y causar efectos negativos a la salud. La fracción fina (PM2.5) Agrupa partículas pequeñas con tamaños menores de 2,5  $\mu\text{m}$  (PM2.5)(Forero & Delgado 2008), estas pueden penetrar el torrente sanguíneo, haciendo más difícil su eliminación y causando afecciones cardiovasculares (Peña et al. 2001).

Identificar la fuentes de emisión de material particulado, permite plantear estrategias para reducir la concentración de este contaminante en el ambiente. Existen herramientas que permiten identificar y cuantificar las fuentes de contaminantes atmosféricos para un sitio específico, estos modelos de fuente-receptor utilizan las características químicas y físicas de los gases y partículas medidos tanto en la fuente como en el receptor para determinar el porcentaje aportado por cada fuente

a la concentración de contaminante(EPA 2016a), algunos de estos modelos de libre acceso desarrollados por la EPA son Chemical Mass Balance (CMB), UNMIX y Positive Matrix Factorization (PMF).

El objetivo de este proyecto es identificar las fuentes que emiten el material particulado con un tamaño igual o menor a 2.5 micras en dos puntos de la ciudad de Bucaramanga, estación Tránsito y Barrio La Joya, para escoger los puntos de muestreo los parámetros analizados fueron, historiales de altas y bajas concentraciones de PM10, así como disponibilidad de viviendas para realizar el estudio epidemiológico. Este proyecto hace parte del proyecto titulado “Efecto de la exposición extra- e intra-domiciliaria a contaminación por material particulado con diámetros aerodinámicos menores de 2,5 micras en los niveles de presión arterial de 24 horas y de aterosclerosis subclínica en población adulta residente en Bucaramanga”, financiado por Colciencias según la convocatoria 569 de 2012 para formar un banco de proyectos de ciencia y tecnología, ejecutado por la Universidad Autónoma de Bucaramanga por medio del investigador principal, el Dr. Víctor Mauricio Herrera Galindo, y co-ejecutado por la Universidad Pontificia Bolivariana por medio del Dr. Kento Taro Magara Gómez. Este proyecto se identifica con el código de Colciencias 124156934459.

Para identificar las fuentes de emisión del PM2.5 se hace uso del modelo CMB (Chemical Mass Balance) de la EPA, el cual no requiere un mínimo de muestras para su funcionamiento, se tomaron muestras ambientales de 15 meses en la zona de alto tráfico vehicular (estación Tránsito) y 9 meses en la zona de bajo tráfico vehicular (Barrio La Joya) y se caracterizaron las muestras para medir el contenido de Black Carbón, Carbono Orgánico Total, especies iónicas solubles en agua y elementos en traza, especies que sirven como guía para estimar las fuentes de PM2.5.

La sección 3 contiene las bases conceptuales referentes al tema de estudio, así como los resultados de investigaciones similares que se han realizado en otros países, en la sección 4 se hace una descripción detallada de la metodología que se siguió para el desarrollo del proyecto, la sección 5 presenta los resultados obtenidos de la caracterización, análisis de las muestras e identificación de las principales fuentes de emisión de PM2.5, finalmente, en la sección 6 se establecen algunas conclusiones y recomendaciones.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

- Identificar las principales fuentes de emisión de material particulado PM2.5 en una zona de alto tráfico y una zona de bajo tráfico vehicular en Bucaramanga mediante la aplicación del modelo de receptor-fuente CMB (Chemical Mass Balance).

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la composición química del material particulado PM2.5 generado en un zona de alto tráfico vehicular durante quince (15) meses, y una zona de bajo tráfico vehicular durante nueve (9) meses.
- Analizar la variación espacial y temporal de la composición del PM2.5 en las zonas de estudio.
- Cuantificar el aporte de las fuentes de material particulado PM2.5 en las zonas de influencia a los puntos de muestreo por medio de la aplicación del modelo de receptor-fuente CMB.

## 2. ANTECEDENTES

El material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), desde hace unos años se considera un contaminante de criterio, ya que se encuentra relacionado directamente con el aumento de enfermedades cardiovasculares, y el riesgo de muerte en los sitios donde los niveles exceden los límites propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS 2005). Con el propósito de ejercer control sobre las emisiones de PM<sub>2.5</sub> y generar soluciones a esta problemática, se ha implementado el uso de modelos de fuente-receptor que permiten identificar las principales fuentes de emisión de este contaminante. Estos modelos emplean herramientas estadísticas y/o matemáticas para determinar el porcentaje aportado por cada fuente a la concentración de contaminante; el modelo usa las características químicas y físicas obtenidas de las muestras del contaminante, las cuantifica a partir de su concentración y las relaciona con las fuentes de emisión(EPA 2016d).

En diferentes ciudades del mundo, incluyendo Bucaramanga, se han realizado estudios para la estimación de fuentes de material particulado (PM), a partir de los cuales se han planteado estrategias para la reducción de la emisión de contaminantes atmosféricos, algunas de las cuales ya han sido implementadas. El área metropolitana de Bucaramanga cuenta con una red de monitoreo de calidad de aire, conformada por 8 estaciones de muestreo, en las cuales se miden algunos de los contaminantes de criterio como NO<sub>x</sub>, CO, O<sub>3</sub>, Y PM<sub>10</sub> (CDMB 2014), sin embargo, en ninguna de las estaciones se realiza medición de PM<sub>2.5</sub>.

En el año 2010 se realizó en Bucaramanga un estudio para la identificación de fuentes de PM<sub>10</sub> empleando los modelos de receptor-fuente PMF y UNMIX, los resultados del análisis con el método PMF, arrojaron los siguientes porcentajes de aporte automotores (61,9%), fuentes geológicas (20,1% ) y otras fuentes (18%). Los

resultados de UNMIX fueron: vehículos automotores (54%), fuentes geológicas (32%) y otras fuentes (14%), los porcentajes obtenidos con ambos modelos son muy similares, y se establece el aporte de automotores como la fuente más relevante.(Rodríguez Villamizar et al. 2010)

Los estudios que se han realizado en Bucaramanga con el fin de evaluar la calidad del aire están enfocados principalmente a la medición de PM10, (Rodríguez Villamizar et al. 2010)(CDMB et al. 2010). Sin embargo, en el año 2015 se llevó a cabo un estudio de identificación de fuentes de material particulado en un sector de alto tráfico vehicular usando el modelo de receptor CMB, del cual se determinaron que las principales fuentes de emisión de PM2.5 en el punto seleccionado fueron los vehículos con motor diésel con un aporte del 22%, los vehículos con motor a gasolina con un 12%, el polvo de construcción con un aporte del 21%, las emisiones de cocinas a base de carbón con el 11%, y las pinturas en aerosol con el 11%. (Barrera & Chavez 2016).

La contaminación atmosférica en Colombia en los últimos años ha sido un tema de gran preocupación, no solo por los impactos generados en la salud y el ambiente, sino porque además es una de las problemáticas que genera mayores costos ambientales después de la contaminación del agua y los desastres naturales (CONPES 3344 2005). Desde 1967 se ha incentivado la toma de medidas para afrontar esta problemática, iniciando con la instalación de las primeras redes de monitoreo de calidad de aire, la norma que reguló la emisión y concentración de contaminantes a la atmósfera fue emitida en 1982, año en el cual se adoptaron los estándares de calidad del aire y de emisión por fuentes fijas mediante el Decreto 02, el cual reglamentó parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979 y el Decreto – Ley 2811 de 1974 en cuanto a emisiones atmosféricas y calidad del aire (MAVDT 2010a).

En marzo de 2005, el Consejo Nacional de Política Económica y Social aprobó el documento Conpes 3344 que contiene los lineamientos para la formulación de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire y recomienda adoptar los lineamientos propuestos en dicho documento para el desarrollo de estrategias de prevención y control de la contaminación del aire; solicita al Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en coordinación con los Ministerios de Minas y Energía, Protección Social y Transporte, adelantar los trámites necesarios para la creación de la Comisión Técnica Nacional Intersectorial para la Prevención y el Control de la Contaminación del Aire, CONAIRE; y solicita a las entidades que integran la CONAIRE concurrir coordinadamente en el desarrollo de las acciones indicadas en el Plan de Acción del documento Conpes y, a partir de la fecha de conformación de la CONAIRE, detallar y ajustar el plan de acción que garantice su efectiva implementación. El documento Conpes 3344 mencionó que en el país, el contaminante monitoreado de mayor interés, dados sus demostrados efectos nocivos sobre la salud humana era el material particulado (PST y PM10) y que con frecuencia las concentraciones de este contaminante superaban los estándares ambientales de la regulación vigente. Sin embargo, el material particulado menor a 2,5 micras (PM2.5), contaminante que afecta de manera importante la salud de las personas, no era medido ni exigido por la legislación colombiana (MAVDT 2010a).

En 2006 se expidió la resolución 0601 por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, en la cual se establecieron los niveles máximos permisibles para los siguientes contaminantes de criterio: PST, PM10, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO (MAVDT 2006), la cual fue modificada por la resolución 0610 de 2010 en la que se incluye el PM2.5 como contaminante de criterio y se establece un valor máximo permisible de 25 µg/m<sup>3</sup> para exposición anual y 50 µg/m<sup>3</sup> para 24 horas de exposición.(MAVDT 2010b).

### **3. MARCO TEÓRICO.**

#### **3.1 MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO.**

El estudio del material particulado atmosférico es de gran interés, ya que este constituye gran parte de la contaminación del aire, por tanto se han desarrollado diferentes métodos que permiten determinar sus características, en cuanto a tamaño, fuente y composición química principalmente, con el fin de conocer su peligrosidad. El material particulado se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros 1999). Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas, aunque esta definición no es estricta. Es necesario considerar que el término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro aerodinámico  $> 20 \mu\text{m}$ ), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (varias horas). Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénicos. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias)(Ibáñez 2004).

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (Mészáros 1999). La emisión de material particulado a la atmósfera, su permanencia y deposición en el medio, puede causar alteraciones en el entorno y en la salud de las personas. Con objeto de minimizar el impacto ambiental y en la salud es necesario poner en funcionamiento estrategias de control y reducción de las

emisiones de material particulado atmosférico, aunque para que éstas sean efectivas deben realizarse de forma paralela con la reducción de las emisiones de gases precursores(Rodríguez & Z 2004).

**3.1.1 Tamaño del material particulado.** El material particulado se encuentra como partículas sólidas y líquidas suspendidas en un gas; y se dividen en dos grandes grupos de acuerdo a su tamaño, como son fracción gruesa y fracción fina, de acuerdo a su diámetro aerodinámico(Reist 1993). La fracción gruesa (PM10) comprende partículas de diámetros aerodinámicos entre 2.5 y 10  $\mu\text{m}$ , estas partículas pueden entrar al tracto respiratorio y causar efectos negativos a la salud, su emisión está relacionada principalmente a con actividades agrícolas, minería, quema de biomasa y resuspensión de polvo. La fracción fina (PM2.5) Agrupa partículas pequeñas con tamaños menores de 2.5  $\mu\text{m}$  (PM2.5), éstas se forman por medio del proceso de “sublimación”, y van aumentando su tamaño gracias a la condensación, donde los gases adicionales se condensan sobre las partículas; otro mecanismo de formación se da por medio de la coagulación, donde dos o más partículas se combinan para formar una sola cadena.(Forero & Delgado 2008)

## **3.2. CARACTERIZACIÓN DEL CONTAMINANTE**

El material particulado, está constituido por diferentes componentes tanto de origen natural, como de origen antrópico, y la proporción que tenga de cada uno de estos le otorga diferentes características en cuanto al tamaño y la toxicidad principalmente, algunos de estos componentes son:

**3.2.1. Materia mineral.** La emisión de partículas minerales se genera por medio de la acción de los vientos sobre la superficie terrestre, en forma de emisiones fugitivas.

La mayor emisión a escala global de este tipo de partícula se produce en regiones áridas o semi-áridas, que se concentran en las latitudes comprendidas aproximadamente entre 10-35° N (donde se incluyen el Norte de África, Oriente Medio y Asia Central)(Prospero 2002)

**3.2.2. Compuestos de Carbono.** El carbono elemental (CE) se emite a la atmósfera, como un aerosol primario, principalmente durante la combustión incompleta de combustibles fósiles (el tráfico, la industria, la calefacción doméstica) y la quema de biomasa, por lo tanto se considera como un indicador directo de la contaminación urbana y la intensidad de tráfico (Ryall et al. 2002). Dependiendo de su proceso de formación, el carbono orgánico se puede clasificar en CO primario (COP) y CO secundario (COS). Las partículas POC son emitidas directamente de las fuentes de emisión (Russell & Allen 2004), mientras que las partículas del SOC se forman por reacción fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles antropogénicos y biogénicos (COV).(Kroll & Seinfeld 2008)

El carbono orgánico y elemental, se emiten en cantidades importantes de gasolina y diésel de vehículos(Stone et al. 2007) · Se ha demostrado la relación del CO y el CE con metales como Ba y Cu que proceden de desgaste de los frenos, por lo tanto estos son indicativos de fuentes móviles.(Lough et al. 2005)

Las mayoría de las formas de Carbono orgánico Soluble en agua son compuestos oxigenados orgánicos tales como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alcoholes y peróxidos; los cuales son emitidos directamente por la combustión, industrial y fuentes naturales (primario), además, se forman a través de procesos secundarios, como lo son la fase gaseosa homogénea y la oxidación de aerosol en fase heterogénea.(Pathak et al. 2011)

**3.2.3. Compuestos de azufre.** Los sulfatos presentes en la atmósfera son generalmente partículas de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan mayoritariamente como resultado de la oxidación de precursores gaseosos (principalmente  $\text{SO}_2$ ), también existen fuentes naturales y antropogénicas de sulfatos primarios, como los yacimientos yesíferos o los procesos industriales de producción de ácido sulfúrico y la producción y manipulación de productos minerales tales como el yeso. (Forero & Delgado 2008)

Las emisiones volcánicas constituyen la segunda fuente de  $\text{SO}_2$  natural, al inyectar grandes cantidades a niveles elevados en la atmósfera. El origen de los óxidos de azufre en estas emisiones se encuentra en el fraccionamiento de compuestos volátiles de azufre en la cámara magmática antes de la erupción (Ibáñez 2004) Los sulfatos de origen no natural, por otra parte, constituyen la fracción principal del material particulado atmosférico antropogénico, y las emisiones antropogénicas a su vez se encuentran en el origen de entre 60-80% del S en la atmósfera a escala global (Chuang et al. 1997). La producción antropogénica de gases precursores de los sulfatos de origen secundario se centra esencialmente en procesos de combustión de combustibles fósiles con alto contenido en S, mayoritariamente carbón y fuel-oil en centrales térmicas y complejos industriales (la combustión de carbón supone en 60% de las emisiones de sulfato antropogénico, el petróleo supone el 28%) (Warn Warneck 1988). El principal compuesto gaseoso emitido es  $\text{SO}_2$ , que se oxida a  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con una velocidad que varía entre 1-10%/hora en función de las condiciones meteorológicas (Aldabe Salinas 2011).

**3.2.4. Compuestos de nitrógeno.** Los compuestos de N en la atmósfera (principalmente  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario y provienen de la reacción de precursores gaseosos naturales y antropogénicos. Estos compuestos representan aproximadamente el 2-5% de las emisiones globales a nivel terrestre (Ibáñez 2004), el diámetro de las partículas atmosféricas resultantes suele ser también  $< 1\mu\text{m}$ . Los compuestos nitrados de origen natural se suelen originar a partir de las emisiones de los suelos (nitrificación,  $\text{N}_2\text{O}$ ), los incendios forestales ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ), las descargas eléctricas ( $\text{NO}$ ) y las emisiones biogénicas ( $\text{NH}_3$ ) (Seinfeld & Pandis 1998). Las emisiones naturales de  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_x$  a escala global constituyen sólo la tercera parte de las emisiones antropogénicas (Mészáros 1999). En cuanto a los precursores gaseosos de los nitratos de origen antropogénico, en la actualidad se conocen numerosas fuentes emisoras entre las cuales destacan la producción eléctrica (combustión de gas, fuel-oil y carbón) y otros procesos de combustión a temperaturas elevadas (capaces de oxidar el  $\text{N}_2$  atmosférico) tales como los que ocurren en los motores de los vehículos y la quema de biomasa. Los principales gases emitidos por fuentes naturales y antropogénicas son así  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$ , cuya oxidación en la atmósfera tiene como resultado más frecuente la formación de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (Mészáros 1999):



La velocidad de reacción de  $\text{OH}$  con  $\text{NO}_2$  es diez veces superior a la registrada entre  $\text{OH}$  y  $\text{SO}_2$ , por lo que la formación de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  en la atmósfera será siempre más lenta que la de  $\text{HNO}_3$  (Aldabe Salinas 2011)

**3.2.5 Metales pesados.** Están presentes generalmente en los aerosoles emitidos a la atmosfera, representando problemas sobre la salud humana debido a que elementos traza tales como Zn, As, Cd, Cr, Pb y Ni, han sido identificados como cancerígenos y altamente tóxicos (Von Schneidmesser et al. 2010). Las fuentes generados de metales toxico en PM2.5 son diversos entres estas se estipula el polvo, diversos procesos industriales, emisiones de los vehículos y combustión del carbón. (Chen et al. 2015)

### **3.3 FUENTES QUE EMITEN EL MATERIAL PARTICULADO.**

#### **3.3.1. Fuentes fijas**

Fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, estas a su vez se clasifican en:

**3.3.1.1. Fuentes puntuales:** Una fuente puntual se refiere a una fuente en un sitio fijo o estacionario, derivadas de la generación de energía eléctrica y de actividades industriales. Sus emisiones 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. Los contaminantes principales asociados a la combustión son partículas (Dióxido de Azufre, óxidos de Nitrógeno, dióxido de Carbono, monóxido de Carbono e hidrocarburos) (Ministerio Medio Ambiente 1995)(EPA 2016b).

**3.3.1.2. Área-Fuente:** 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. Esta fuente también incluye las emisiones de actividades como son: el tratamiento de aguas residuales, plantas de compostaje, rellenos sanitarios, entre otros.(Ministerio Medio Ambiente 1995).

**3.3.1.3. Fuente Natural:** Producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos (tipo geológico), emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales, quemas de hojas, bosques o maleza. (Allen 2002)

Las principales fuentes geológicas consideradas que se consideran en el estudio urbano son el polvo de carretera, polvo de construcción y el polvo arrastrado por el viento los cuales generalmente se ubican dentro del material particulado grueso pero por su aerodinámica se extienden a las partículas finas.(EPA 2016d)

### **3.3.2. Fuente fija dispersa o difusa**

Fuente en que los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área, por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión, como lo son las quemas abiertas controladas en zonas rurales (Ministerio Medio Ambiente 1995)(EPA 2016b).

### **3.3.3. Fuentes móviles**

Fuente de emisión que por razón de su uso, es susceptible de desplazarse, como los automóviles, aeronaves, buques o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Ministerio Medio Ambiente 1995)

En el área urbana los vehículos con motor diésel y gasolina son los principales contribuyentes de material particulado, las cuales realizan directamente su aporte a la atmosfera, estas fuentes móviles aportan al ambiente en mayor proporción carbono elemental, carbono orgánico, amonio y sulfatos aunque cabe destacar el aporte por el uso del freno y de los neumáticos las cuales generan menor cantidad y diferentes contaminantes con relación a los mencionados anteriormente, debido a esto es necesario crear fuentes diferentes para ellas, pero considerándolas dentro de la clasificación de fuentes móviles y más específica de las fuentes vehiculares.(EPA 2016)

### **3.4. IMPACTO SOBRE LA SALUD Y EL AMBIENTE DEBIDO A LA EXPOSICIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5**

La problemática mundial relacionada con la contaminación atmosférica ha despertado preocupación en una gran parte de la población ya que se relaciona directamente con afectaciones a la salud humana, el crecimiento de algunos sectores como el industrial y el parque automotor han contribuido significativamente a este problema de contaminación del aire en las ciudades, por otra parte, en el sector rural se relaciona principalmente con la quema de biomasa usada para la cocción de alimentos (Tong Zhu, Megan Melamed et al. 2012), con el fin de generar algunos controles se realizan análisis para observar cuales son los sectores que más contaminan y que afectaciones causan en la salud humana.

La inhalación del material particulado y su eliminación del cuerpo humano está directamente relacionada con su tamaño, las partículas más grandes son más fáciles de eliminar o retener y las más pequeñas, estudiadas en este caso, pueden penetrar el torrente sanguíneo, haciendo más difícil su eliminación y causando afecciones cardiovasculares (Peña et al. 2001)

A lo largo de algunos años diferentes estudios han buscado demostrar la relación que existe entre la exposición al material particulado y el incremento del riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares y respiratorias(Boldo et al. 2011) (Pui et al. 2014) (Deng et al. 2016). La organización mundial de la salud, con el fin de reducir este riesgo establece valores guía de calidad de aire, estos valores han sido calculados según dos parámetros, una larga exposición medida en un año y una corta exposición medida en 24 horas (OMS 2005).

Un análisis realizado en Estados Unidos encontró una disminución en el riesgo de contraer enfermedades cardiovasculares en algunas ciudades donde se ejerció un control a la emisión de PM2.5, pero solo para las enfermedades cardiovasculares mas no para afecciones directamente a los pulmones y cáncer del mismo.(Laden et al. 2006), sin embargo exposiciones en puntos donde la concentración de PM2.5 supera los 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Nivel establecido anualmente para PM2.5) aumentan riesgos de mortalidad en un 3% y aumenta la probabilidad de contraer enfermedades respiratorias y cardiovasculares.(Shi et al. 2016)

De igual forma algunas investigaciones han determinado el aumento de riesgo o complicación de cardiopatía isquémica (taconamiento arterias) a personas que ya tienen de alguna manera lastimado algún vaso coronario, esto debido a la exposición a PM2.5 (Pope et al. 2006).

El ambiente es otro aspecto afectado con la emisión de material particulado, ya que la deposición de partículas puede alterar ciclos químicos de acuerdo a la composición de este material causando cambios en el equilibrio del suelo, daños en algunas infraestructuras de las ciudades e impedimentos en la visibilidad, estas son algunas de las afecciones del material particulado al ambiente. (CEC 2008)

### **3.5. MODELOS DE RECEPTORES**

Los modelos de receptores son herramientas matemáticas y/o estadísticas empleadas para identificar y cuantificar las fuentes de contaminantes atmosféricos para un sitio específico (receptor). Estos modelos utilizan las características químicas y físicas de los gases y partículas medidos tanto en la fuente como en el receptor, con el fin de encontrar una correlación entre los perfiles de concentración

de cada fuente y el perfil de concentración del receptor. (EPA 2016a). Algunos de estos modelos de libre acceso desarrollados por la EPA son Chemical Mass Balance (CMB), UNMIX y Positive Matrix Factorization (PMF).

**3.5.1 CMB.** El modelo de receptor “balance de masa de especies químicas” (CMB, por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente usado durante dos décadas para conocer la contribución de partículas de fracción gruesa (PM10) y fina (PM2.5), para hacer seguimiento a las estrategias de control en Estados Unidos, el modelo CMB requiere de perfiles de especiación de las fuentes que probablemente aportan mayor cantidad de PM y de los datos ambientales correspondientes a las muestras analizadas en el lugar de muestreo (EPA 2016a)

El modelo se basa en una solución lineal de ecuaciones que resulta de la suma de las contribuciones de las fuentes a la concentración de la muestra, aplica la teoría de mínimos cuadrados ponderados. Una ventaja del modelo es que requiere un número pequeño de muestras pero como inconveniente de este modelo surge el análisis factorial de los perfiles de emisión ya que es necesario tener un perfil de todas las principales fuentes locales pertinentes en la emisión para determinar las contribuciones de origen en la muestra (EPA 2016a)

Ecuación fundamental del modelo receptor:

$$C_i = F_{i1} * S_1 + F_{i2} * S_2 + F_{i3} * S_3 + \dots + F_{ij} * S_j \quad (5)$$

Donde:

$C_i$  = Concentración de la especie “i” medida en el sitio receptor

i = Especie química; i = 1, 2,...I

j = Fuente que contribuye; j = 1, 2,...J

$F_{ij}$  = Fracción de las emisiones de la especie “i” a partir de la fuente “j” (proporcional a la masa)

$S_j$  = Impacto al receptor (contribución calculada) de la fuente “j”  
(EPA 2016c)

La aplicación del modelo CMB implica las siguientes suposiciones: a) la composición de las emisiones de las fuentes involucradas es constante durante el tiempo de medición; b) la incertidumbre de cada fuente es independiente y presenta una distribución normal; c) las especies químicas no reaccionan entre sí; d) los perfiles de las fuentes son linealmente independientes uno de otro (Kleeman 2003). Sus requerimientos relativos al conocimiento de los perfiles de las fuentes de emisión hacen su aplicación poco práctica en muchas ciudades del mundo, como Bogotá (Behrentz Valencia et al. 2009)

Por otra parte, una ventaja importante en la aplicación del modelo CMB es que requiere un número relativamente pequeño de muestras (generalmente menor a 25) (Bruinen de Bruin et al. 2006).

**3.5.2 UNMIX.** El modelo de la EPA, UNMIX, emplea las concentraciones de las especies químicas medidas en el aire ambiente para identificar las fuentes que realizan el aporte de material particulado. A diferencia del CMB, no se requieren perfiles químicos de las fuentes, ya que se generan internamente a partir de los datos ambientales en UNMIX, utilizando una fórmula matemática basada en análisis factorial. Para una determinada selección de especies, UNMIX estima el número de fuentes, las composiciones de origen, y las contribuciones de origen a cada muestra.(EPA 2016d)

Al igual que en el modelo CMB, en el modelo UNMIX se supone que: a) la composición de las emisiones de las fuentes es constante a través del período de monitoreo, b) los perfiles de las fuentes son linealmente independientes unos de los

otros y c) las especies químicas no reaccionan entre sí. Para poder hacer uso de esta metodología, el número de fuentes o sus categorías deben ser menores o iguales al número de especies analizadas (Bruinen de Bruin et al. 2006). Una ventaja de este modelo es que tiene la capacidad de identificar gran cantidad de fuentes, pero para esto se requiere de gran cantidad de muestras. (Henry 2005)

**3.5.3 PMF.** La metodología PMF se basa en el principio de análisis de factores por medio de un robusto algoritmo de mínimos cuadrados que se encuentra asociado con cortos tiempos de respuesta (Hwang & Hopke 2011). La principal ventaja de este modelo tiene que ver con la inclusión de una restricción de no negatividad para los resultados referentes a las cargas de los elementos para cada uno de los componentes identificados así como para los puntajes factoriales. (Behrentz Valencia et al. 2009). Sin embargo, esta restricción podría tener implicaciones como que las cargas negativas en los factores identificados podrían ser indicadores de interacciones reales e interesantes de evaluar entre las variables bajo estudio. Al imponer dicha restricción, se pierde la posibilidad de identificar tales interacciones (Chan & Mozurkewich 2007).

Al igual que el modelo UNMIX el modelo de receptor PMF requiere una gran cantidad de muestras (más de 50 muestras), para obtener resultados confiables. (Behrentz Valencia et al. 2009)

### **3.6 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE**

En el área metropolitana del Valle de Aburra se han realizado diversos estudios para la estimación de fuentes de material particulado (PM10 y PM2.5) (Forero & Delgado 2008) (Área Metropolitana del Valle de Aburra 2008) (Gómez Marín et al. 2011). Estos estudios señalan a las fuentes móviles, como los mayores emisores

de material particulado en el ambiente, por lo que sugieren que las autoridades gubernamentales y ambientales enfoquen sus acciones a mejorar la calidad de los combustibles, implementar medidas que incentiven la tecnología post-combustión, el continuo control de gases vehiculares y el uso de medios alternos de transporte, programas de chatarrización, y una mejor sistematización del transporte masivo. La creciente preocupación por los niveles de contaminación atmosférica ha hecho que estas recomendaciones tomen mayor fuerza y en Medellín se han implementado diversas alternativas para reducir los niveles de contaminación, algunas de ellas son más días sin carro y sin moto de 2 y 4 tiempos, restricción en el uso de vehículos oficiales de funcionarios públicos, restricciones para volquetas, sistema de metro gratis en horas valle (por temporadas) y mayor control de las emisiones vehiculares, además de trabajar continuamente en el mejoramiento del sistema de transporte público. (Secretaría de Movilidad de Medellín 2016)

En otro caso, con el fin de implementar los *Elementos técnicos para el Plan Decenal de Descontaminación en Bogotá (2009)*, se realizó un estudio basado en la caracterización de material particulado y el uso de modelos de receptores en diferentes zonas de la ciudad, Los resultados del estudio corroboraron que la zona industrial de Bogotá presenta niveles de contaminación por material particulado indiscutiblemente mucho más elevados que los encontrados en otras zonas de la ciudad (promedio diario de PM10 de  $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , rango entre 25 y  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la modelación por receptores demostró ser de gran importancia ya que a través de la misma fue posible identificar particularidades específicas para la ciudad en lo que se refiere a los responsables de su problema de contaminación. (Behrentz Valencia et al. 2009)

En la ciudad de México en el año de 2002, se realizó un estudio con el fin de determinar la contribución de las fuentes de PM2.5 para lo cual se hizo uso del modelo CMB en el cual se identificaron que las emisiones vehiculares hacen el mayor aporte de material particulado. (Zárata et al. 2002)

Para este estudio se usaron 33 perfiles de emisión determinados de fuentes locales ubicadas en la zona metropolitana de la ciudad de México y se agruparon en 3 tipos de fuentes principales como polvos dentro de los cuales se tomaron polvos naturales y polvos barridos contaminados por diferentes sustancias, cocción de alimentos y transporte en el cual se incluyen perfiles determinados en las calles, avenidas, cruces y Diésel que incluye el transporte público y de carga. (Zárate et al. 2002). Algunas políticas que se han establecido en la ciudad de México con el fin de mejorar la calidad del aire son: mejorar la cuantificación de las emisiones de vehículos a diésel, investigar las fuentes generadoras de altos niveles de metanol, incentivar o hacer obligatorio el uso de pinturas de bajos COV, programa para la verificación de mantenimiento en carretera para taxis y otros vehículos altamente contaminantes, incentivar la renovación de la flota vehicular, incentivar el uso del transporte público y controlar el manejo de emisiones de quema abierta de biomasa. (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México 2011)

En el continente Asiático algunos países como China, Indonesia y Japón se han visto muy afectados por la problemática de contaminación atmosférica, lo que ha llevado al desarrollo de un gran número de investigaciones enfocadas a este problema, (Liu et al. 2015) (Feng et al. 2016) (Deng et al. 2016), uno de estos estudios se realizó en el período 2001-2007 en Indonesia un estudio del aporte de las diferentes fuentes de material particulado, aplicando el modelo PMF. El modelo PMF pudo identificar las fuentes de material particulado en la ciudad de Bandung utilizando las especies químicas obtenidas de este estudio. Los resultados muestran que durante la temporada de lluvias, las partículas finas fueron aportadas predominantemente por la emisión de vehículos (35%) y por aerosoles secundarios (26%). Otras fuentes detectadas fueron la quema de biomasa, el polvo de cal, y el polvo del suelo. Durante la estación seca, las partículas finas fueron aportadas predominantemente por aerosoles secundarios ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) (25%), industria de la galvanoplastia (24%), emisiones de vehículos (22%) y la quema de biomasa (16%). (Lestari & Mauliadi 2009), con el fin de reducir la contaminación hecha por

parte de los vehículos la cual tanto en época de lluvia como de en la estación seca es la que más aporta material particulado se crearon algunas leyes respecto al uso de los vehículos y el mantenimiento periódico que debe realizarse a todos los vehículos (OMS 2002), por otra parte los incendios forestales hacen parte de un gran problema de emisión de material particulado al ambiente causando daños a la salud humana y al entorno, problemática que trata de resolverse creando zonas de protección forestal y capacitando a los bomberos con el fin de resolver más rápido esta problema en el caso de presentarse (Nicolas et al. 2009).

## 4. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos a continuación se describen las actividades a realizar.

### **4.1. DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO PM2.5 GENERADO EN LA ZONA DE ALTO TRÁFICO VEHICULAR DURANTE QUINCE MESES Y EN LA ZONA DE BAJO TRÁFICO VEHICULAR DURANTE NUEVE MESES.**

**4.1.1. Selección de los puntos de muestreo.** Para seleccionar los puntos de muestreo los parámetros analizados fueron historiales de altas y bajas concentraciones de PM10, así como disponibilidad de viviendas para realizar el estudio epidemiológico, los puntos seleccionados fueron estación Tránsito (considerada una zona de alto tráfico vehicular) y Barrio La Joya (considerada una zona residencial).

**Municipio:** Bucaramanga (Santander)

**Zona:** Centro de la ciudad. Intersección de la Calle 50 con Carrera 15, estación Tránsito

El muestreo se realizará en zona la Intersección de la Calle 50 con Carrera 15, la cual está clasificada como una zona comercial según el Plan de Ordenamiento Territorial (POT)- (2013 – 2027)

Según el POT es considerada área de actividad comercial tipo 2, también está clasificado como área de actividad múltiple tipo 1, debido a su ubicación central en la ciudad con predominio de actividades específicas (calzado, zona rosa, metalmecánica, puntos de reparación automotriz), se define el área de este punto de muestro como Área Comercial y de servicios livianos, ya que esta zona está destinada principalmente al desarrollo de actividades comerciales especializadas y venta de servicios generales y empresariales.

En la zona donde está ubicado el punto de muestreo se encuentran las siguientes vías, las cuales generan un aporte de contaminantes para el sector:

- La diagonal 15, ubicada en la intersección del punto de muestreo, es una de las principales vías de la ciudad, por la cual, actualmente transitan vehículos del Sistema Integrado de Transporte Masivo (SITM) denominado Metrolínea, clasificando esta vía como con un Tránsito promedio diario de 5000 a 10000 vehículos por día, adicionalmente, se moviliza vehículos de servicio público colectivo, vehículos de carga y vehículos particulares. (Barrera & Chavez 2016).
- Cercano al punto de muestreo existe una intersección con la carrera 17, como se ilustra en la figura 2, la cual es considerada una vía arterial secundaria, se caracteriza por presentar un alto flujo de vehículos por día o en algunos casos el mayor número de personas movilizadas por día y facilitan la conexión de los principales flujos vehiculares nacionales de paso por el área urbana, desplaza en los ambos sentidos, no obstante, el trafico sur a norte se dirige por un túnel que atraviesa por la diagonal 15.

En este punto se presentan altas concentraciones de material particulado (reportadas en los años 2004 y 2006, estudios realizados por la CDMB) los cuales sobrepasaron la norma anual establecida por la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Esta situación mejoró con la implementación del servicio de Metrolínea que

atraviesa toda la carretera 15, disminuyendo la contaminación de forma significativa. En la figura 1, se indica el punto de localización del equipo de muestreo.

**Figura 1. Ubicación punto de muestreo, estación Tránsito**



Fuente: Google Maps, 2016, Modificado por los autores.

**Figura 2. Punto de muestreo, estación Tránsito**



Fuente: Autores.

**Municipio:** Bucaramanga (Santander)

**Zona:** Barrio La Joya, carrera 11 occidente con calle 36

El muestreo se realizará en una vivienda ubicada en la carrera 11 occidente con calle 36, esta zona se clasificó como una zona residencial según el Plan de Ordenamiento Territorial (2013 – 2027).

Tiene un promedio de flujo vehicular entre 90 y 100 vehículos por hora entre semana y sábados y un menor flujo los días domingos. La fuente móvil de mayor circulación y contaminación son las motos que constituyen el 40% del flujo vehicular total (CDMB et al. 2010).

En la figura 3, se indica el punto de localización del equipo de muestreo.

**Figura 3. Ubicación punto de muestreo, Barrio La Joya**



Fuente: Google maps

**Figura 4. Punto de muestreo, Barrio La Joya**



Fuente: Autores

Cercanías al punto de muestreo se encuentran las siguientes vías, las cuales generan un aporte considerable de contaminantes para el sector:

- La calle 37 está ubicada muy cerca del punto de muestreo, es la calle principal de acceso al Barrio La Joya por el cual transita una ruta alimentadora del Sistema Integrado de Transporte Masivo(SITM) llamado Metrolínea, una ruta de servicio público colectivo algunos vehículos de carga de pequeño tamaño y vehículos particulares.
- La calle 36 y la carrera 11 Oeste son vías de acceso a las viviendas por las cuales solo transitan motocicletas y vehículos particulares, (ver figura 4).

**4.1.2. Caracterización del material particulado PM2.5.** Debido a limitaciones presupuestales, la caracterización del material particulado se realizó a muestras compuestas, conformadas por 5 filtros que corresponden a un mes de muestreo.

Para el análisis de las muestras se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

✓ Masa: La masa total del PM se determinó por análisis gravimétrico utilizando balanzas de precisión ( $\pm 0.001$  mg). Esta medición se realizó para los filtros de membrana de teflón, recomendados para ejecutar esta clase de medición. Cada filtro se pesó antes y después de usarlo con el objetivo de determinar el peso neto ganado de PM<sub>2.5</sub> (Dimosthenis A. Sarigiannisa, b, Spyros P. Karakitsiosa, b, Marianthi Kermenidoua, Spyridoula Nikolakia, Dimitrios Zikopouloa, Stauros Semelidisa, Apostolos Papagiannakisa 2014). El Volumen de aire por muestra se determinó a partir del promedio de caudales medidos al momento de instalar y retirar el filtro multiplicado por el número de horas de muestreo. La concentración másica de PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente se calcula como la masa total recolectada dividido por el volumen de aire muestreado y se expresa en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

✓ Aniones y cationes

Sulfatos, nitratos, cloruros, amonio, sodio, calcio y potasio (iones solubles en agua) se midieron mediante extractos de agua de los filtros de fibra de cuarzo por medio de cromatografía de intercambio iónico (Elizabeth Stone a et al. 2009). La caracterización de estos compuestos hace parte de la información que requiere CMB para la identificación de fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub>.

✓ Carbono orgánico total

Las concentraciones de carbono orgánico total (TOC) fueron medidas por medio del ASTM D 7573-09, método de prueba estándar para carbono total y carbono orgánico en el agua por la alta temperatura de combustión catalítica y detección de infrarrojos que se utiliza para muestras que contienen altos niveles de material particulado (Analytical 2011). Esto, utilizando filtros de fibra de cuarzo que presentan alta capacidad de retención de las partículas y menor absorción de humedad y realizando un análisis de muestras compuestas por medio de fracciones tomadas de cada filtro.

✓ Metales solubles en agua

Los metales solubles en agua se midieron a partir de muestras compuestas extruidas de filtros de teflón por medio de agua ultra pura. El análisis se realizó por medio de espectrofotometría de masas con plasma inducido (ICP/MS) (Von Schneidmesser et al. 2010). El contenido de estos elementos es importante para la identificación de fuentes y la estimación de la potencial de toxicidad del material particulado.

✓ Black Carbon

Será determinado por la metodología de Transmisómetro OT21. El instrumento mide la absorción óptica de las partículas depositadas en el filtro muestreado utilizando una fuente de luz de longitud de onda de funcionamiento a 880 nm (IR), el cual proporciona una medición cuantitativa del BC (Elizabeth Stone et al. 2009).

Con los resultados determinados de masa, TOC, BC, e iones y metales solubles en agua en el PM<sub>2.5</sub>, se aplicará un modelo de receptores con el objetivo de determinar las fuentes de emisión principales en el área. Estos resultados se generan con el fin de servir para apoyar la formulación y renovación de normatividad a nivel local.

## **4.2 ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LA COMPOSICIÓN DEL PM<sub>2.5</sub> EN LAS ZONAS DE ESTUDIO.**

**4.2.1 Relación entre las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y el flujo vehicular.** En base a resultados reportados en la bibliografía de conteo de fuentes móviles para el Barrio la joya y la estación de Tránsito se construyó una tabla con el fin de analizar la relación entre el flujo de vehículos tanto de motores diésel como de gasolina con la concentración de PM<sub>2.5</sub> en cada punto de muestreo.

**4.2.2 Variación temporal y espacial de la composición fisicoquímica de las muestras.** Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica se reportaron gráficamente con el fin de identificar una tendencia en la composición de las muestras durante el periodo evaluado en cada punto y analizar su variación temporal, a su vez se analizó la correlación entre las composiciones de ambos puntos de muestreo (iones, metales, BC, TOC) para establecer la variación espacial en la composición del PM2.5 y predecir las posibles fuentes de emisión.

**4.2.3 Análisis de las condiciones meteorológicas durante el periodo de muestreo.** A partir de los datos meteorológicos reportados por la estación ubicada en el Barrio Real de Minas y empleando el programa de libre acceso WRPLOT view se construyó la rosa de vientos para cada periodo de muestreo y para el tiempo total de estudio, con el fin de identificar la dirección predominante del viento y establecer una posible relación con la composición de PM2.5 en cada punto de muestreo, adicionalmente se mediante el coeficiente de correlación de Pearson la influencia de la velocidad de viento y la precipitación sobre las concentraciones de PM2.5 en cada punto de muestreo.

**4.2.4 Identificación de posibles alteraciones en las condiciones del ambiente.** Dentro del tiempo de toma de las muestras es posible que el entorno se haya visto afectado por incendios o actividades que cambien relevantemente el aporte de material particulado en magnitud o en fuente de emisión por lo tanto en esta actividad se identifican estas actividades y se relacionan con los datos caracterizados.

### **4.3 CUANTIFICACIÓN DEL APORTE DE LAS FUENTES DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5 EN LAS ZONAS DE INFLUENCIA AL PUNTO DE MUESTREO POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DEL MODELO CMB**

**4.3.1 Aplicación del modelo.** Para desarrollar esta actividad se utiliza el modelo CMB ya que es el único que no cuenta con restricción de muestras para la determinación de las fuentes, el uso del modelo se realiza bajo una simulación en la que se relacionan los resultados del análisis químico hecho a cada una de las muestras con fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub>, el perfil de las fuentes empleado para este estudio se tomó de la base de datos desarrollada por la EPA, SPECIATE 4.0, la cual es un compilado que reúne la información de las concentraciones de las especies químicas en muestras de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, que emiten algunas fuentes de Canadá, Estados Unidos, y México registradas en el programa, de tipo antrópico y geológico (Fujita et al. 2007), para escoger las fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub> de interés para este estudio, se realizó un análisis del sector y una revisión bibliográfica de estudios anteriores realizados en zonas con características similares.

**4.3.1.1 Software:** El modelo CMB es obtenido del sitio web de la EPA (Environmental Protection Agency), la cual lo proporciona de forma gratuita y sin ninguna restricción, de igual forma en el sitio web se encuentra el manual y el protocolo de uso, para realizar la simulación es importante tener en cuenta algunos parámetros de validación de datos como el Chi<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> y el porcentaje de masa los cuales al correr el modelo tienen que encontrarse dentro de ciertos rangos Chi<sup>2</sup> 0-4 entre más cercano a cero mejor es la correlación de datos, R<sup>2</sup> 0.8-1 este debe encontrarse lo más cercano a 1, y el porcentaje de masa puede estar entre 80%-120%(EPA 2016a).

**4.3.2 Análisis de resultados arrojados por el modelo de receptores aplicado con anterioridad.** Esta actividad tiene como fin dar a conocer las fuentes de emisión identificadas mediante el modelo usado (CMB), cuantificar el aporte que cada una realiza al ambiente y comparar las fuentes de emisión encontradas en los dos sitios donde se realizó la toma de las muestras.

**4.3.3 Correlación de los resultados con la bibliografía pertinente.** En varias partes del mundo se han realizado estudios similares y lo que busca esta actividad es relacionar los resultados obtenidos en la ciudad de Bucaramanga con los estudios hechos en algunas partes de Europa y Estados Unidos para comparar las fuentes obtenidas con las que se encontraron en esos países y tener una mayor certeza del análisis realizado.

**4.3.4 Correlación de las fuentes identificadas por el modelo de receptores con las emisiones en el punto de muestreo.** En esta actividad se pretende encontrar la relación que existe entre las fuentes encontradas mediante el uso del modelo CMB y caracterización que se realizó a las muestras de ambientes tomadas en los dos puntos de la Ciudad de Bucaramanga.

Luego de identificar estas fuentes de forma puntual se procedió a entregar la información a los encargados del estudio epidemiológico para constatar la relevancia de dichas emisiones en las enfermedades cardíacas de la población implicada.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 INVENTARIO DE FUENTES

**5.1.1 Censo de fuentes móviles.** En las tablas 1 y 2 se resume el número de vehículos que transitan por las vías cercanas a cada punto de muestreo, tomando como referencia estudios anteriores que se han realizado en estos mismos puntos. El porcentaje de vehículos con motores a gasolina es significativamente mayor en ambos sectores siendo el 91% en la estación Tránsito y el 90% en el Barrio La Joya, dentro de este tipo de vehículos se incluyen los taxis, vehículos particulares y las motocicletas que en el 2014 representaban el 56% del total de vehículos en el área metropolitana de Bucaramanga (Vanguardia Liberal 2014), para los vehículos con motores diésel el aporte es 9% y 10% respectivamente, dentro de estos se incluye el sistema integrado de transporte masivo (METROLINEA), buses, busetas y vehículos de carga.

**Tabla 1. Inventario de fuentes móviles intersección carrera 17 con diagonal 15 (estación Tránsito)**

tipo de fuente móvil	motores diésel	motores gasolina	total
Número de vehículos promedio por hora	464	4992	5456
proporción	9%	91%	100%

Fuente:(Barrera & Chavez 2016), modificado por los autores

**Tabla 2. Inventario de fuentes móviles Barrio La joya**

Tipo de fuente móvil	Motores diésel	Motores gasolina	Total
Número de vehículos promedio por hora	21	197	218
Proporción	10%	90%	100%

Fuente: (CDBM- et al. 2010), modificado por los autores.

En diferentes estudios realizados sobre la influencia del tipo de combustible en la emisión de PM<sub>2.5</sub>, se ha establecido que aquellos vehículos que tienen motores diésel generan un aporte mucho más significativo de masa de PM<sub>2.5</sub> por unidad de combustible quemado, es decir, tienen un mayor factor de emisión, (Herrera Montañez 2007) (Ban-Weiss et al. 2008) (Kim Oanh et al. 2010), sin embargo, aunque los niveles de emisión de PM<sub>2.5</sub> individualmente son mucho menores para los vehículos de gasolina que para los de diésel, muchos estudios han demostrado que los vehículos de gasolina tienen una contribución superior en masa total de PM<sub>2.5</sub> en las ciudades donde estos son un porcentaje mucho mayor que los vehículos de diésel (Shen et al. 2014), estas características se dan en lugares como Estados Unidos (Gertler 2005), Beijing (Shen et al. 2014) y Bogotá (Ruiz Ramos 2006), por tanto, en base al inventario de fuentes móviles realizado para los dos puntos de muestreo en el presente estudio, es de esperarse que el aporte de vehículos a gasolina sea superior que el de vehículos diésel.

Uno de los objetivos del presente estudio es comparar las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en dos zonas con diferencias significativas de tráfico vehicular, la tabla 3 presenta los resultados del flujo promedio de vehículos tanto de motor a gasolina como diésel y la concentración promedio de PM<sub>2.5</sub> en cada punto de muestreo, se puede observar que el flujo vehicular en la estación Tránsito es 25 veces mayor que el flujo vehicular en el Barrio La Joya, y a su vez la concentración promedio mensual de PM<sub>2.5</sub> es 1,35 veces más alta en la estación Tránsito con respecto al Barrio La Joya.

**Tabla 3. Concentración mensual promedio de PM2.5 y flujo vehicular mensual promedio, estación Tránsito y Barrio la Joya**

Punto de muestreo	Concentración mensual promedio PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Número de vehículos con motores diésel	Número de vehículos con motores gasolina
Tránsito	22,9	14384	154752
La Joya	16,9	651	6107

Fuente: autores

**5.1.2 Identificación de fuentes fijas.** En el inventario de fuentes fijas para la estación Tránsito se identificaron principalmente establecimientos comerciales dedicados a la venta, reparación y mantenimiento de motocicletas, algunos restaurantes y locales de carpintería; la joya es una zona netamente residencial, en la cual no se identificaron potenciales fuentes fijas de emisión de material particulado.

**5.1.3 Episodios no frecuentes de generación de PM2.5.** Además de las fuentes fijas y móviles de PM2.5 que se identificaron en cada punto de muestreo, se realizó una revisión de los diferentes eventos, principalmente incendios, que se presentaron durante el periodo de muestreo y pueden tener alguna incidencia en las concentraciones de PM2.5, la tabla 4 resume estos resultados.

**Tabla 4. Episodios no frecuentes de generación de PM2.5 durante el periodo de muestreo**

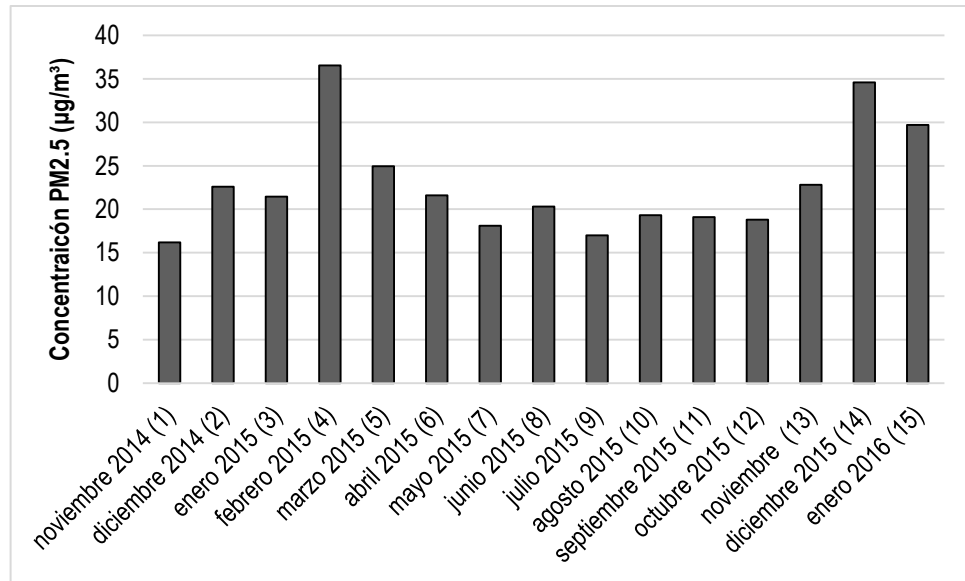
Fecha	Lugar	Fuente
7/11/2014	Zarabanda-Santander	Incendio afectó 11 viviendas en Bucaramanga- Vanguardia Liberal
5/3/2015	Carrera 27 con calle 45	Controlan incendio en la carrera 27 con calle 45 de Bucaramanga-Vanguardia Liberal
7/3/2015	Barrio Diamante 1	Incendio consumió estructura de un vivero en Bucaramanga-Vanguardia Liberal

Fecha	Lugar	Fuente
5/10/2015	Calle 58 con carrera 41- Barrio Terrazas	Incendio en Bucaramanga consumió 500 metros de vegetación- Vanguardia Liberal
20/10/2015	Universidad Cooperativa de Colombia (UCC)	Incendio destruyó parte de la antigua hemeroteca de la UCC de Bucaramanga-Vanguardia Liberal
27/11/2015	Barrios Girardot, Mutis, La Feria, El Porvenir, Santander y Ciudad Norte.	Incendios forestales han arrasado laderas de la meseta de Bucaramanga- Vanguardia Liberal
5/2/2016	Carrera 23 # 30-25	Incendio en apartamento de Bucaramanga genero pánico- Vanguardia Liberal

## 5.2 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO PM2.5

En las tablas 1 y 2 del anexo A se presentan los filtros que hacen parte de cada una de las muestras compuestas de la estación Tránsito y el Barrio La Joya, respectivamente, estas tablas contienen la información sobre las fechas, volumen, masa y concentraciones de cada muestreo, así como de la concentración y masa final de la muestra compuesta, como se mencionó anteriormente, por restricciones presupuestales la mayoría de las muestras se conformó con cinco filtros que se dejaron en el punto de muestreo durante una semana, sin embargo algunos de estos filtros fueron descartados por inconsistencias durante la medición.

**Gráfica 1. Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, estación Tránsito**



En la gráfica 1 se representan los resultados obtenidos durante los 15 meses de muestreo para la estación de Tránsito, en el mes de febrero 2015 (4), se presenta mayor concentración de material particulado fino ( $36,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

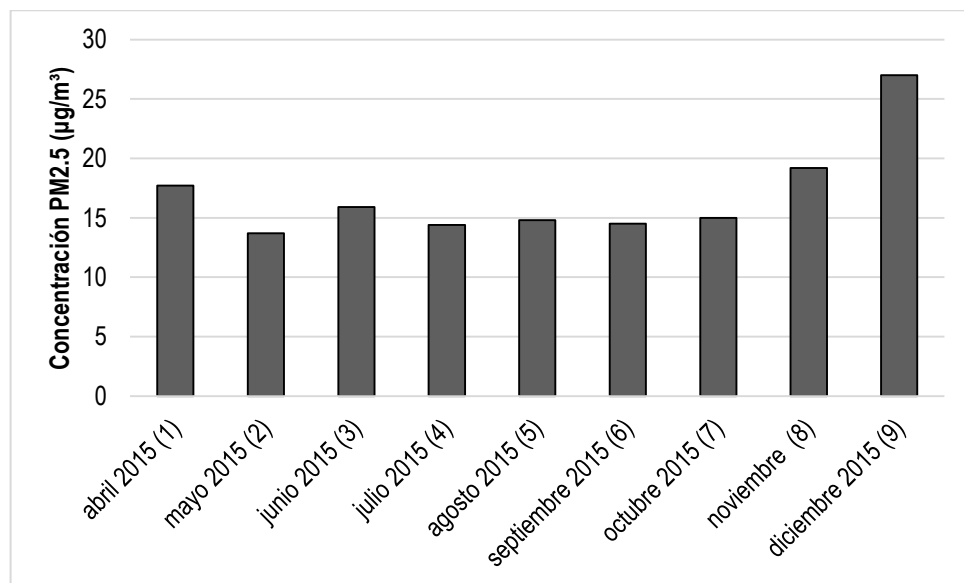
las muestras correspondientes a los meses de diciembre 2015 (14) y enero 2016 (15) también presentan alta concentración de material particulado fino en el periodo de muestreo ( $34,6$  y  $29,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) respectivamente, las que presentan menor concentración de material particulado son las muestras de noviembre 2014 (1) y julio 2015 (9) ( $16,2$  y  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) respectivamente, las demás muestras oscilan en un rango de concentración entre ( $18,1$  y  $24,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con una concentración promedio de  $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Es importante tener en cuenta que durante el periodo de muestreo febrero 2015 (4), se presentó un incendio en la carrera 27 con calle 45, durante el periodo Octubre 2015 (12) se presentaron incendios en los Barrios Girardot, La Feria, El Porvenir, Santander y Ciudad Norte (Vanguardia Liberal 2015b) y en el periodo de enero 2016

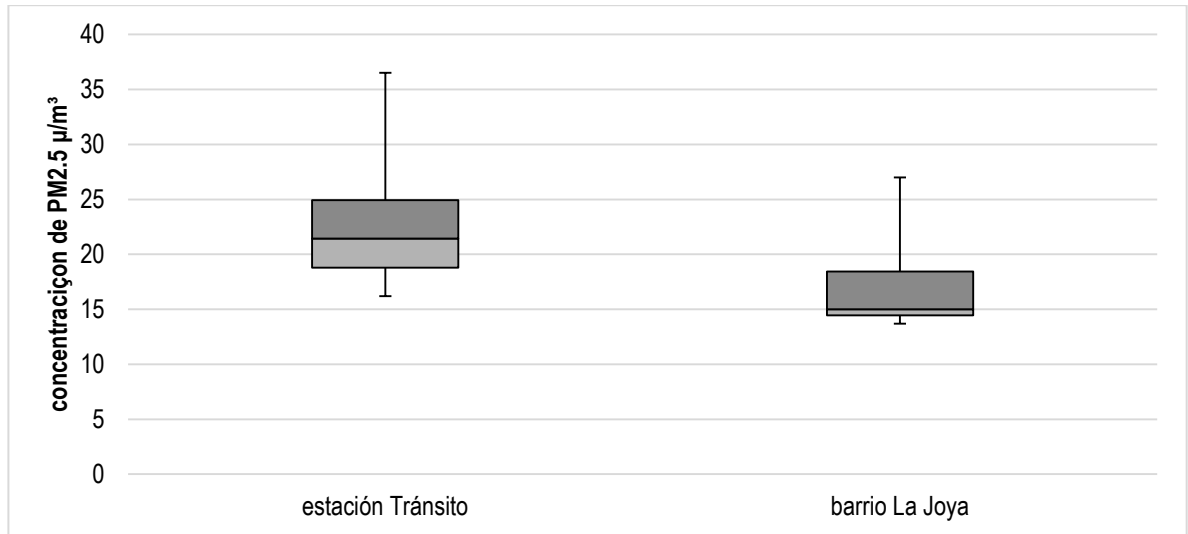
(5) se presentó un incendio en la carrera 23 N° 30-25 (Vanguardia Liberal 2016), (Vanguardia Liberal 2015a), los cuales por la cercanía y las corrientes de viento (Nor-Oeste) pueden ser responsables de un aumento en las concentraciones de PM2.5 de la estación Tránsito (calle 50 con carrera 15) para estas fechas. Los demás incendios que se presentaron durante el periodo de muestreo no se consideran relevantes por su ubicación.

En el punto de monitoreo del Barrio La Joya la muestra diciembre 2015 (9) es la que presenta mayor concentración durante todo el periodo de muestreo ( $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), así mismo las muestras abril 2015 (1), y noviembre 2015 (8) presentan unas concentraciones altas ( $17,7$  y  $19,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) respectivamente, la muestra mayo 2015 (2) fue la que presentó menor concentración ( $13,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mientras que el resto de muestras mantienen un comportamiento constante con una concentración promedio de  $14,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . (Ver gráfica 2)

**Gráfica 2. Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, Barrio La Joya**



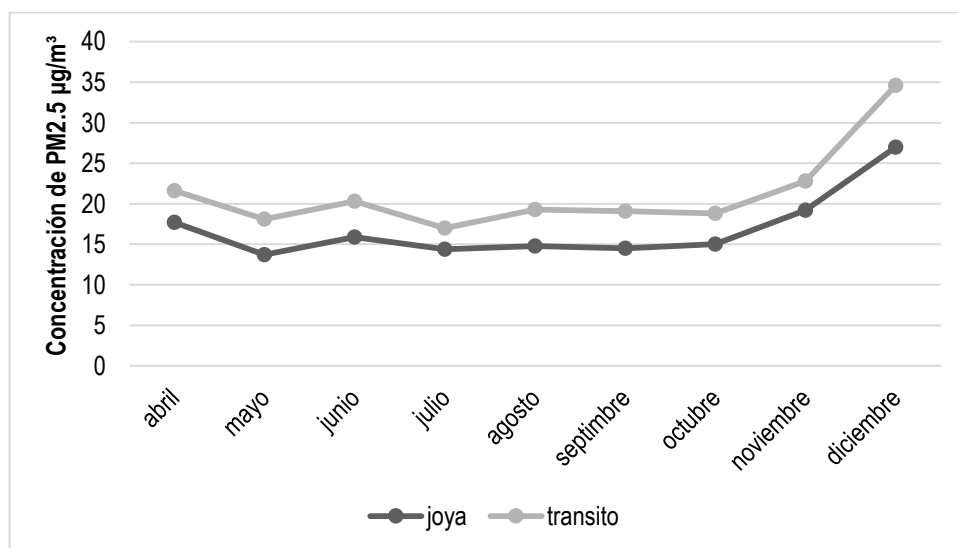
**Gráfica 3. Comportamiento en la distribución de PM2.5 para la estación de Tránsito y el Barrio la joya**



En la gráfica 3 se puede observar que la concentración media de PM2.5 en la estación Tránsito está entre (18,8 y 24,9  $\mu/m^3$ ), mientras que para el Barrio La Joya es de (14,4 y 18,4  $\mu/m^3$ ), la dispersión de este 50% de los datos fue mucho mayor para la estación de Tránsito que en el Barrio La Joya, lo que nos indica que en la Joya las concentraciones promedio de PM2.5 son mucho más estables, tanto para la estación de Tránsito como para la Joya la dispersión de concentraciones es mucho mayor en el 25% de los datos que tienen las concentraciones más altas que en el 25% de los datos que representan las menores concentraciones, esto indica que en relación con la concentración promedio de PM2.5 hubo eventos que aumentaron significativamente las concentraciones de PM2.5 pero no ocurrió algo que las redujera significativamente, no se presentaron valores atípicos en ninguno de los puntos de muestreo, por lo cual se tomaron en cuenta todas las muestras en el modelo CMB.

Con el fin de comparar la variación espacial y temporal de las concentraciones de PM2.5 se Gráficaron los resultados que se obtuvieron durante el periodo en común de muestreo para ambos puntos, este comprende los meses entre abril y diciembre del 2015.

**Gráfica 4. Variación espacial y temporal de las concentraciones de PM2.5, estación de Tránsito y Barrio la Joya**



En la gráfica 4 se puede observar que para el mismo periodo de tiempo, la concentración de PM2.5 es mayor en la estación Tránsito en todo momento respecto al barrio La Joya, la variación de las concentraciones respecto al tiempo presenta la misma tendencia en ambos puntos de muestreo, lo cual se corrobora con un coeficiente de correlación de Pearson alto (0.987), esto hecho se atribuye a que las muestras tomadas son de aire ambiente y evidencia que la contaminación en un punto no depende solo de las fuentes cercanas a este, sino que es el resultado del transporte de contaminantes y las diferentes variables que influyen en este, adicionalmente se pueden observar picos en las concentraciones de PM2.5 para los meses abril, junio, noviembre y diciembre que corresponden a las temporadas de

vacaciones de semana santa, mitad de año y fin de año respectivamente, esto se atribuye a que en estas fechas aumenta el flujo de vehículos particulares por la llegada de turistas a la ciudad y por la suspensión temporal del pico y placa en algunas festividades.

**Tabla 5. Valores de concentración de PM2.5 medidos estación Tránsito y barrio La Joya, norma Colombiana Y OMS**

	Estación Tránsito	Barrio La Joya	Norma colombiana (12 meses)	OMS (12 meses)
PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	21,875	16,9	25,000	10,000

En la tabla 5 se comparan el valor promedio anual de PM2.5 para la estación de Tránsito y el barrio La Joya, con los valores establecidos en la norma colombiana y la Organización Mundial de la Salud, es importante resaltar que debido a que el muestreo fue durante nueve meses, el valor del barrio la Joya corresponde a una estimación en base a las concentraciones promedio de las muestras y no a un año calendario como establece la norma. Los valores de concentración de PM2.5 en ambos puntos de muestreo cumplen con la norma colombiana ya que no sobrepasa los 25 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sin embargo, supera en más del doble la concentración recomendada por la OMS, lo cual representa un riesgo potencial para la salud de los habitantes del sector.

### **5.3 RELACIÓN ENTRE LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y LAS CONCENTRACIONES DE PM2.5**

A partir de los datos meteorológicos reportados por la estación ubicada en el Barrio Real de Minas se construyó una rosa de vientos para cada uno de los periodos de muestreo, los resultados se presentan en la tabla 6, en la cual se puede observar

que para los primeros meses de muestreo (1, 2,3 y 4) la dirección predominante del viento proviene del noroeste, mientras que para el resto de meses la dirección predominante proviene del noreste, la velocidad del viento estuvo entre 0,5 y 5,7 m/s, y el porcentaje de calmas siempre fue más del 38% y menos del 68%. La tabla 7 muestra todas las variables meteorológicas promedio (temperatura, velocidad del viento, humedad relativa, presión, radiación solar y precipitación) por muestra compuesta.

**Tabla 6. Dirección y velocidad del viento durante cada periodo de muestreo**

Muestra compuesta	Dirección del viento	% calmas	0.5-2.1 m/s %	2.1-3.6 m/s %	3.6-5.7 m/s %
Noviembre 2014	NW	67.8	18	12.7	1.5
Diciembre 2014	NW	49.2	25.6	20	5.1
Enero 2015	NW	44.1	25.4	22	8.5
Febrero 2015	NW	55.4	28.6	12.3	3.8
Marzo 2015	NW	50.4	31.9	17.4	0.2
Abril 2015	NE	56.4	22.7	18.8	2.2
Mayo 2015	NE	64.4	19.3	15.7	0.6
Junio 2015	NE	60.3	17.5	19.4	2.8
Julio 2015	NE	51.9	24.2	18.9	5
Agosto 2015	NE	51.6	23.3	21.2	3.9
Septiembre 2015	NE	44.3	26.6	19.9	9.3
Octubre 2015	NE	48.4	24.1	21.1	6.4
Noviembre 2015	NE	42.1	23.4	27.1	7.3
Diciembre 2015	NE	39.1	28.9	24.6	7.4
Enero 2016	NE	38.6	27.4	26	8.1

Fuente: autores

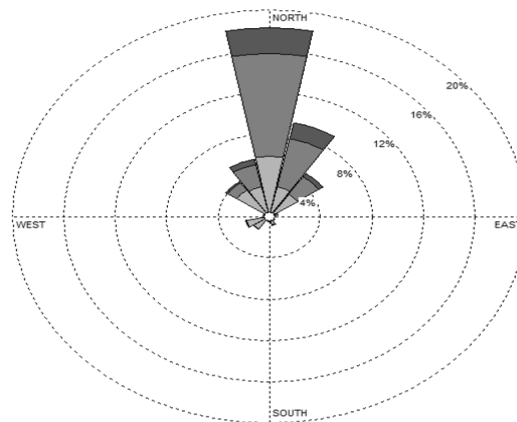
En la tabla 7 se presentan los valores de las diferentes variables meteorológicas medidas en la estación del barrio Real de Minas, la temperatura promedio vario en un rango entre 23,1 y 26,1 °C, la humedad relativa estuvo en un rango entre 67,3 y 85,7 % y la precipitación estuvo entre 0,0 y 0,3 mm.

**Tabla 7. Variables meteorológicas promedio en cada periodo de muestreo**

Muestra compuesta	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Humedad relativa (%)	Presión (atm)	Radiación solar (W/m <sup>2</sup> )	Precipitación (mm)
Noviembre 2014	23.1	1.2	85.7	0.9	156.3	0.3
Diciembre 2014	24.3	1.2	76.2	0.9	178.7	0.0
Enero 2015	24.6	1.3	78.0	0.9	195.1	0.1
Febrero 2015	26.1	1.2	67.3	0.9	301.9	0.1
Marzo 2015	25.0	1.0	71.3	0.9	282.8	0.1
Abril 2015	25.9	1.1	71.4	0.9	268.3	0.1
Mayo 2015	24.3	0.9	82.3	0.9	168.7	0.1
Junio 2015	25.4	0.9	75.5	0.9	172.0	0.0
Julio 2015	24.6	1.1	78.9	0.9	168.4	0.0
Agosto 2015	24.8	1.1	78.8	0.9	173.2	0.1
Septiembre 2015	25.0	1.3	78.3	0.9	186.8	0.0
Octubre 2015	24.0	1.2	81.9	0.9	167.1	0.1
Noviembre 2015	25.2	1.3	78.4	0.9	220.9	0.0
Diciembre 2015	25.6	1.4	74.1	0.9	207.8	0.0
Enero 2016	25.9	1.4	76.2	0.9	198.4	0.1

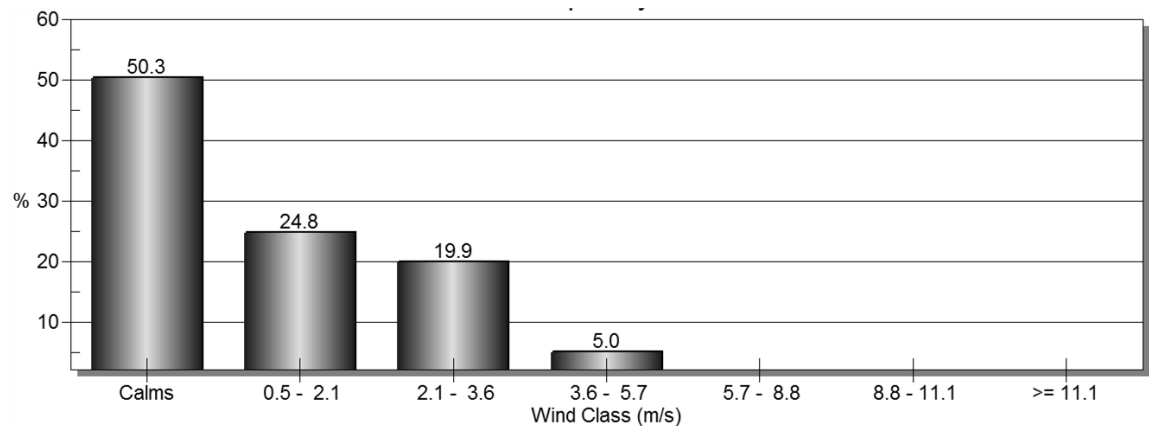
Fuente: autores

**Gráfica 5. Rosa de vientos Barrio Real de Minas, Bucaramanga, Santander, Colombia, octubre 2014 - marzo 2016.**



Fuente: Autores

**Gráfica 6. Distribución de frecuencia de vientos Barrio Real de Minas, Bucaramanga, Santander, Colombia, octubre 2014 - marzo 2016.**

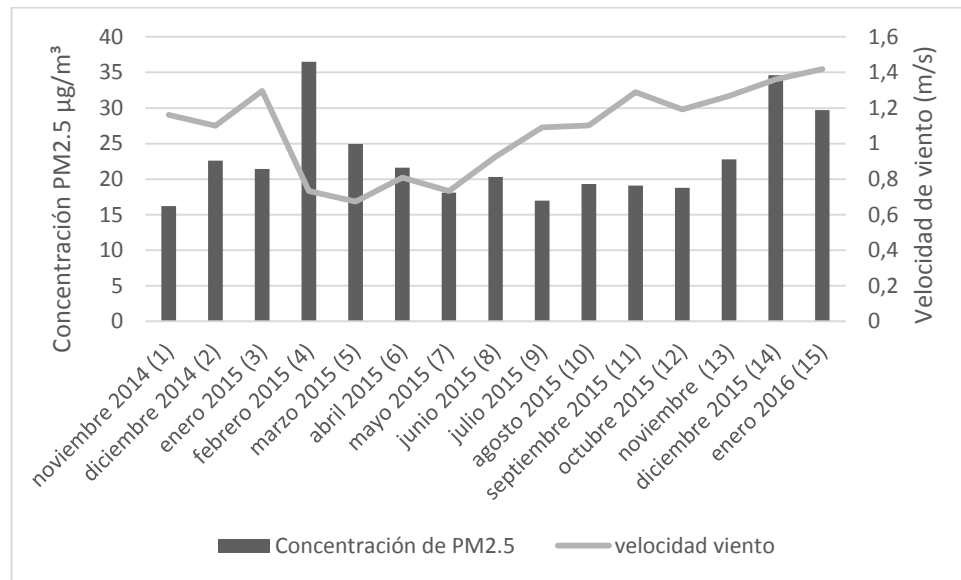


Fuente: autores

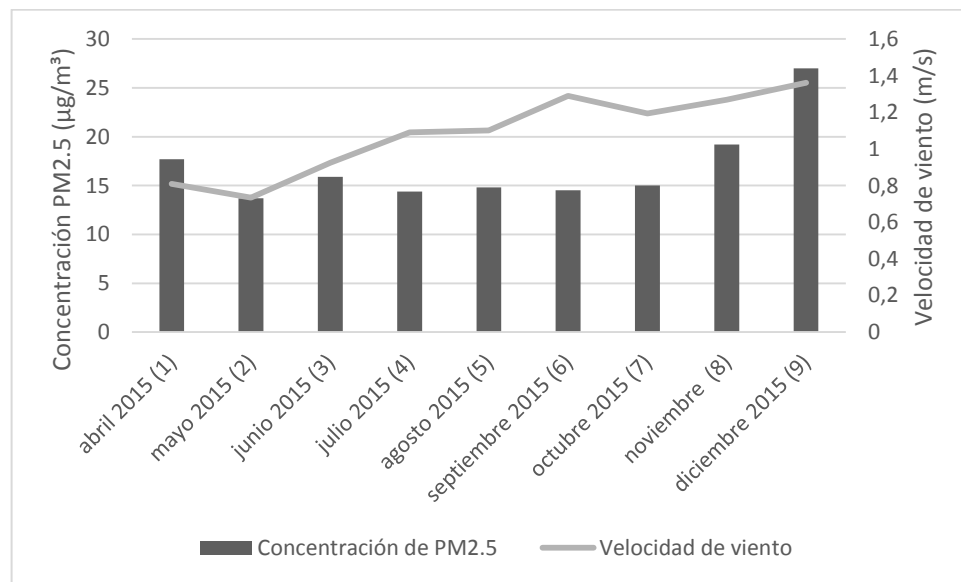
En la gráfica 5 se presenta la rosa de vientos construida a partir de los datos reportados por la estación meteorológica del Barrio Real de Minas durante todo el periodo de muestreo, se puede observar que la dirección predominante del viento es en sentido Norte-Sur, con un rango de velocidades entre 0,5 y 5,7 m/s y porcentaje de calmas de 50,3%, (Ver gráfica 6). Durante este periodo la temperatura promedio fue 25,7 °C, humedad relativa promedio 76,9% y precipitación promedio de 0,01 mm.

Para analizar la variación temporal de las concentraciones de PM2.5 y la influencia de las variables meteorológicas sobre estas, se evaluó el coeficiente de correlación de Pearson entre las concentraciones de PM2.5, la velocidad del viento, la precipitación y la humedad relativa, ya que estas son las variables meteorológicas de mayor incidencia en la concentración de PM2.5 (Silva Vinasco & Canchala 2013).

**Gráfica 7. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y velocidad del viento (m/s) estación Tránsito y Barrio la joya**



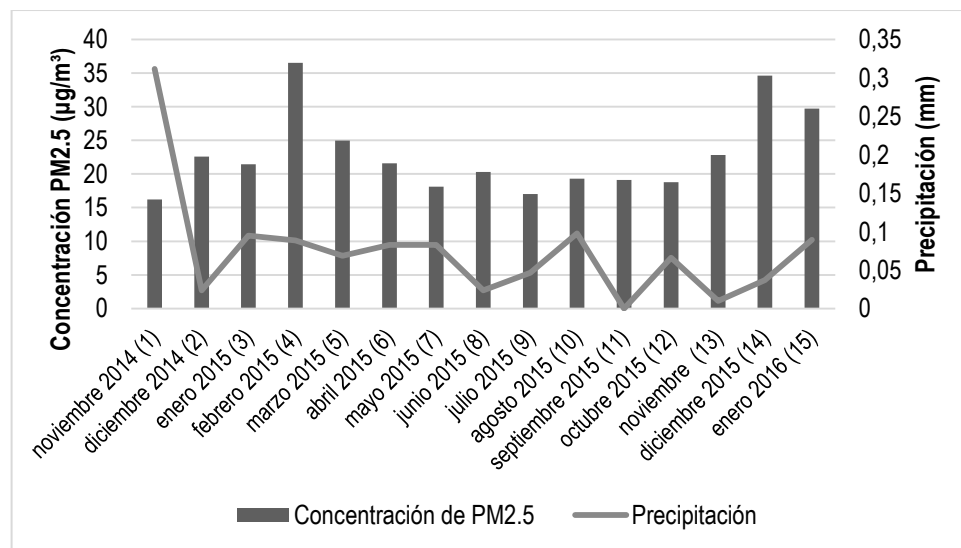
**a) Estación Tránsito**



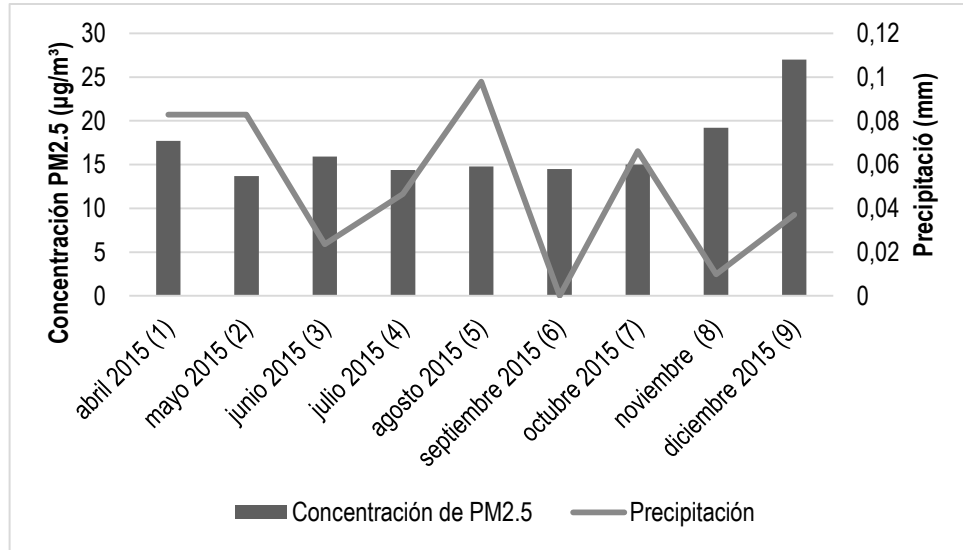
**b) Barrio La Joya**

En las gráficas 7 se presenta la concentración de PM2.5 y la velocidad de viento en cada muestra para la estación Tránsito (a) y el barrio La Joya (b), se observa que en algunos picos de alta velocidad la concentración es baja y en los de menor velocidad las concentraciones son las más altas, por lo cual se podría establecer una relación inversa entre la velocidad del viento y la concentración de PM2.5, esto se debe a que las altas velocidades de viento favorecen la dispersión de contaminantes y, por tanto, reducen las concentraciones de material particulado (Silva Vinasco & Canchala 2013). El coeficiente de correlación de Pearson para la estación de Tránsito (-0,2) y para la Joya (-0,3), por lo que se establece que si existe una relación inversa entre la velocidad del viento y las concentraciones de PM2.5, sin embargo, esta relación es baja ya que las variables meteorológicas afectan principalmente a las partículas de mayor tamaño (PM10) (Silva Vinasco & Canchala 2013).

**Gráfica 8. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y precipitación (mm), estación Tránsito y Barrio La Joya**



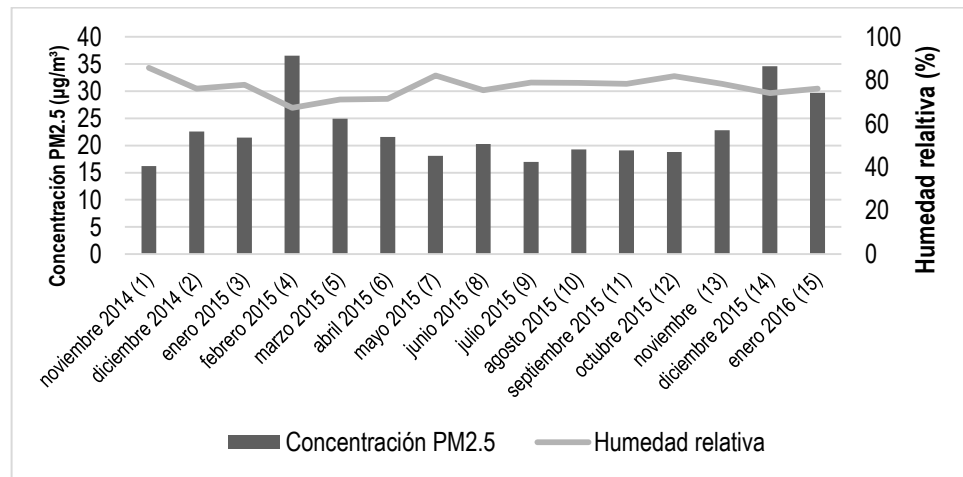
a) Estación Tránsito



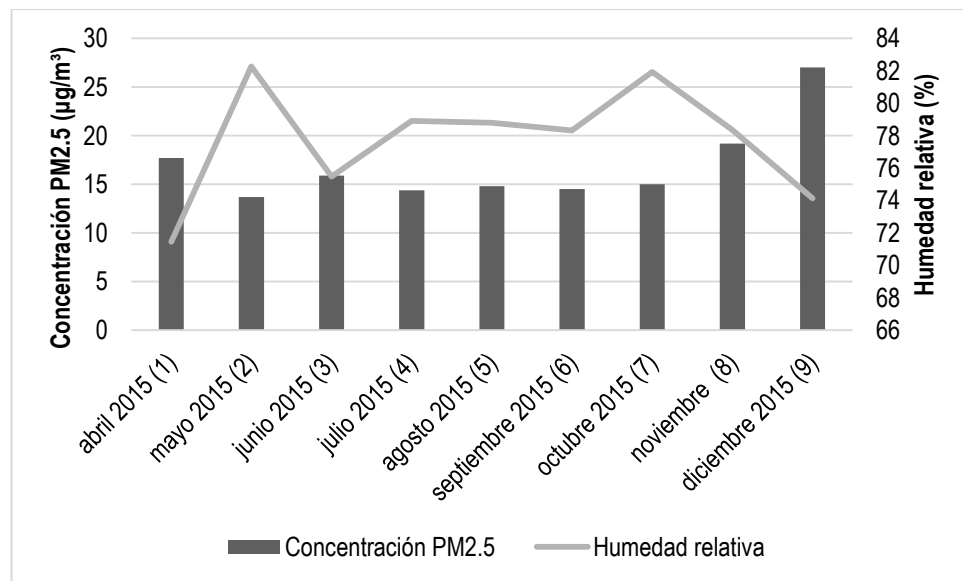
b) Barrio La Joya

La gráfica 8 presenta la concentración de PM<sub>2.5</sub> y la precipitación en cada muestra para la estación Tránsito (a) y el barrio La Joya (b), se observa que al igual que con la velocidad de viento existe una tendencia a disminuir la concentración de PM<sub>2.5</sub> cuando aumentan los niveles de precipitación y viceversa, ya que mayores precipitaciones facilitan procesos de dilución del contaminante, mientras que bajas precipitaciones propician la acumulación de partículas suspendidas y por ende aumenta la concentración de material particulado (Silva Vinasco & Canchala 2013). El coeficiente de correlación de Pearson es para la estación de Tránsito (-0,2) y para el Barrio La Joya (-0,24), por lo que se establece que si existe un relación inversa entre la precipitación y las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, sin embargo, esta relación es baja ya que como se había mencionado anteriormente estas variables afectan principalmente a las partículas de mayor tamaño (PM<sub>10</sub>) (Silva Vinasco & Canchala 2013). Con base en la rosa de los vientos se puede afirmar que parte del material particulado proviene del norte del punto de muestreo, y con base en datos históricos de la red de monitoreo de la calidad del aire de Bucaramanga, es muy probable que las zonas de alto tráfico del centro de Bucaramanga sean el origen.

**Gráfica 9. Concentración de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y humedad relativa (%), estación Tránsito y Barrio la joya**



**a) Estación Tránsito**



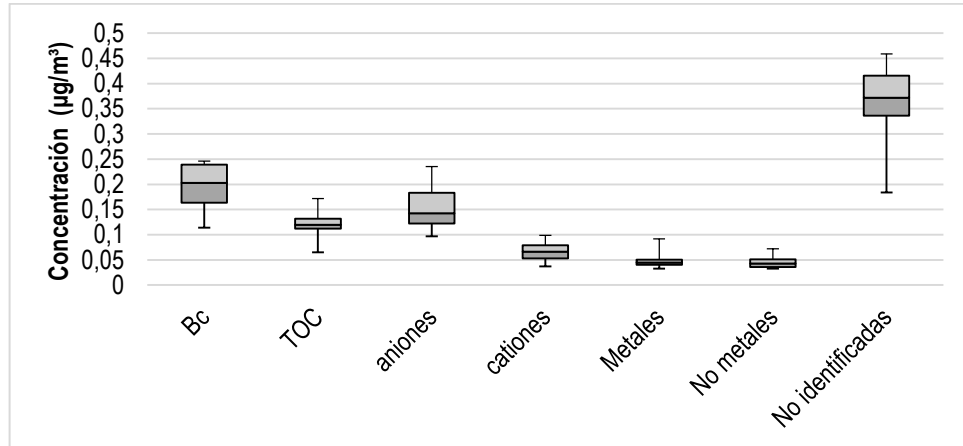
**b) Barrio La Joya**

En la gráfica 9 se presenta la concentración de PM2.5 y la humedad relativa en cada muestra para la estación Tránsito (a) y el barrio La Joya (b), se observa que al igual que con la velocidad de viento y la precipitación, existe una tendencia a disminuir la concentración de PM2.5 con el aumento en los niveles de humedad. El coeficiente de correlación de Pearson para la estación de Tránsito (-0,74) y para la Joya (-0,57), por lo que se establece que si existe un relación inversa entre la precipitación y las concentraciones de PM2.5, esta relación a diferencia de las anteriores es bastante significativa (media-alta), por lo que se concluye que la humedad es la variable meteorológica que tiene mayor incidencia en las concentraciones de PM2.5 para el presente estudio.

## 5.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL PM2.5

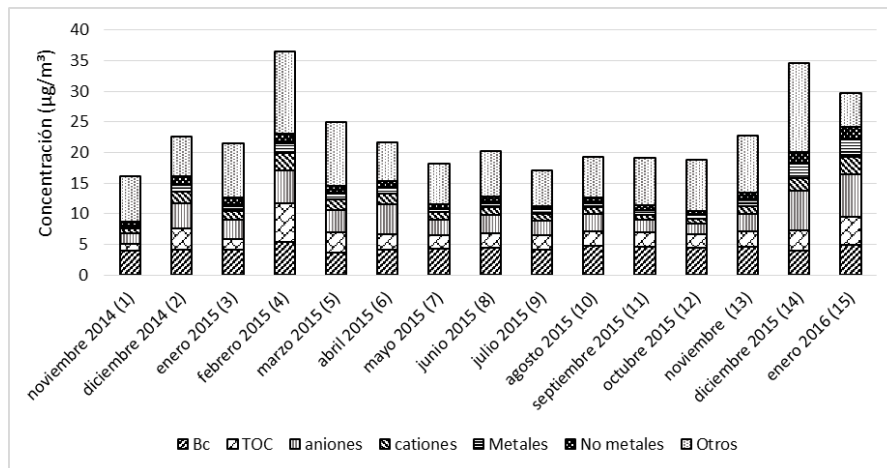
La compilación de resultados correspondiente a la caracterización fisicoquímica de las muestras compuestas para la estación de Tránsito y el barrio La Joya se presenta en el anexo B, las gráficas 10 a la 22 se realizan en base a estos datos.

**Gráfica 10. Variación de la composición (%p/p) de PM2.5, estación Tránsito.**



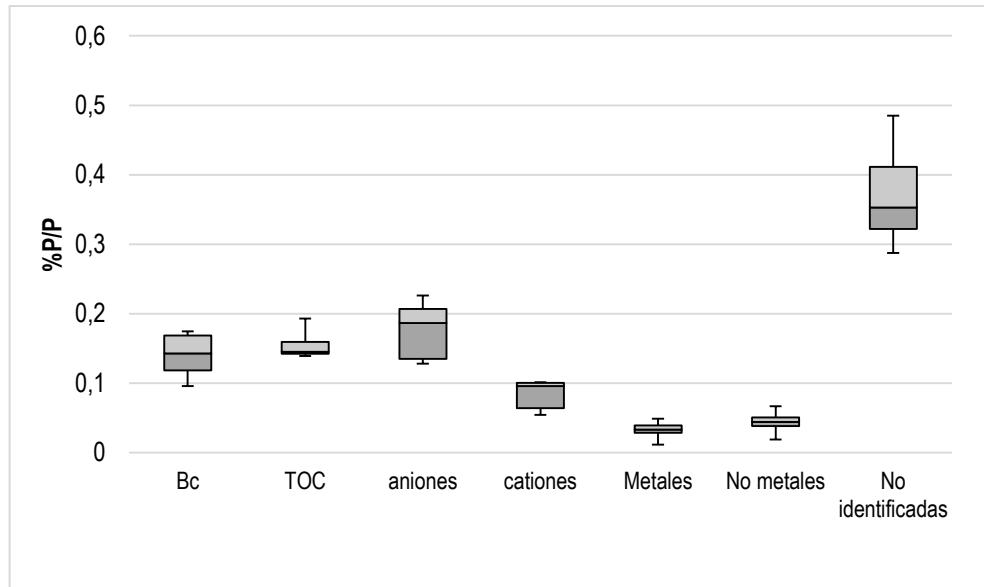
En la gráfica 10 es posible observar la variación que existe de cada especie química en el total de las muestras tomadas para la estación de Tránsito, de las especies identificadas la que más aporta es el BC, en este se puede observar un rango significativo de concentraciones para el promedio de los datos (16-24%), con un valor mínimo de 11% y máximo de 25%, en segundo lugar los aniones con valores promedio (12-18%), el mínimo fue 10% y el máximo 24%, y el TOC que presenta valores promedio muy estables, el 50% de los datos esta entre el (11 y 13%), sin embargo tiene gran dispersión hacia los extremos, siendo el menor valor 7% y el mayor 17%, los cationes (4-10%), metales (3-9%) y no metales (3-7%) presentan concentraciones mucho más bajas que los compuestos anteriores y a su vez una menor dispersión. Las especies no identificadas son las que se encuentran en mayor proporción y a su vez presentan la mayor variación, los valores promedio están entre (34 y 42%), un valor mínimo de 18% y máximo de 46%.

**Gráfica 11 Composición ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, estación Tránsito**



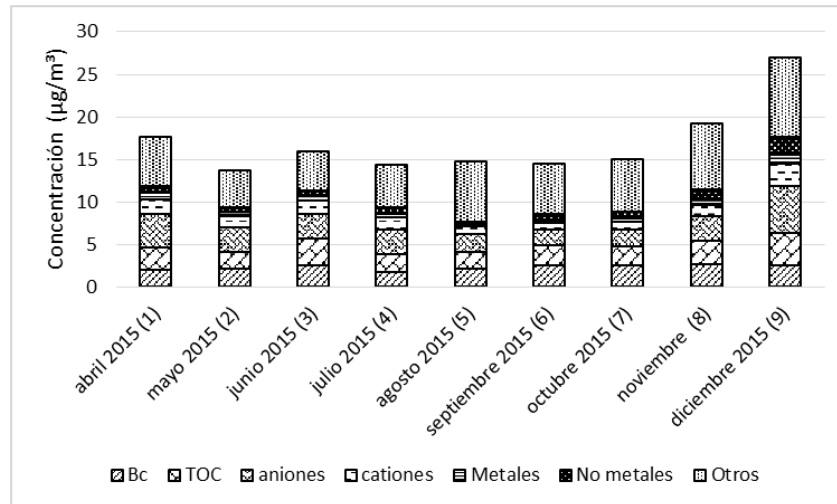
La Gráfica 11 presenta la composición en concentraciones de cada una de las muestras de PM2.5 para la estación de Tránsito, se puede observar que aunque las concentraciones varían en el tiempo, la proporción de las especies que la componen es similar siempre, lo que indica que las fuentes de emisión de material particulado son las mismas durante todo el periodo de muestreo, pero que se presentan algunas variaciones en cuanto a la intensidad del aporte.

**Gráfica 12. Variación de la composición (%p/p) PM2.5, Barrio la Joya**



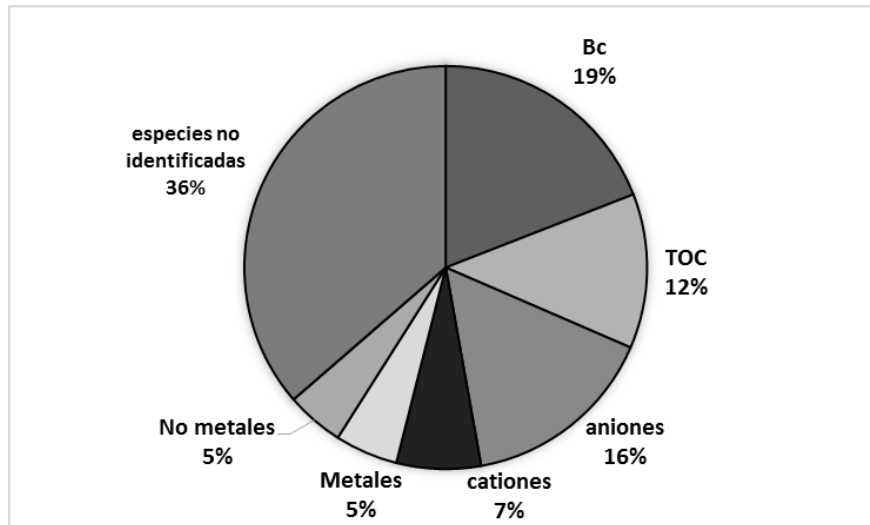
En la gráfica 12 es posible observar la variación que existe de cada especie química en el total de las muestras tomadas para el Barrio La Joya, en general se puede observar poca variaciones entre los resultados para cada especie, de las especies identificadas las que más aportan son los aniones con una variación amplia en los valores promedio (13-21%), y una baja dispersión hacia los extremos, el mínimo fue 13% y el máximo 23%, el TOC que presenta valores promedio muy estables, el 50% de los datos esta entre el (14 y 16%), y una baja dispersión hacia los extremos, siendo 14% el valor mínimo y 19% el máximo, y por último el BC, con un rango de concentraciones para el promedio de los datos (12-17%), con un valor mínimo de 10% y máximo de 17%, los cationes (5-10%), metales (1-5%) y no metales (2-7%) presentan concentraciones mucho más bajas que los compuestos anteriores. Las especies no identificadas al igual que en la estación de Tránsito, Gráfica 9, son las que se encuentran en mayor proporción y a su vez presentan la mayor variación, los valores promedio están entre (32 y 41%), un valor mínimo de 29% y máximo de 49%.

**Gráfica 13 Composición ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de PM2.5, Barrio la Joya**

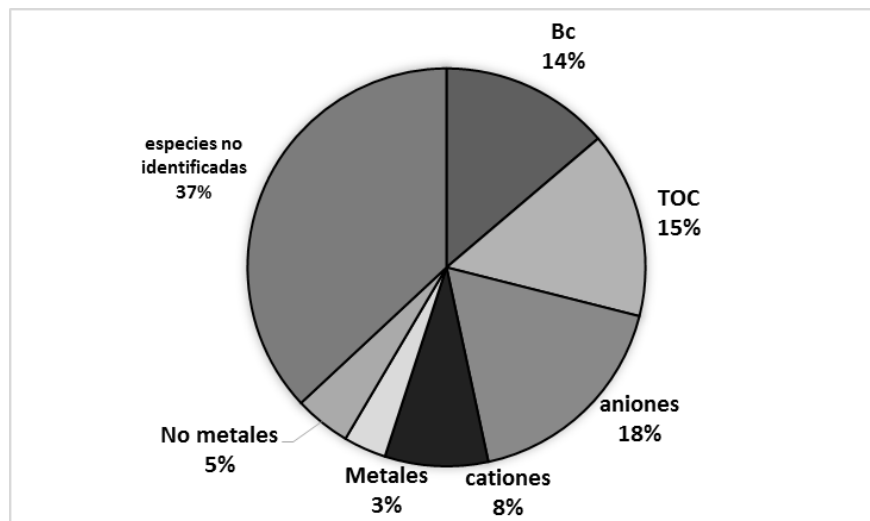


En la gráfica 13 es posible observar que aunque la concentración de PM2.5 varía en el tiempo de acuerdo a factores antropogénicos y geológicos, al igual que lo analizado en la gráfica 12, la proporción de las especies químicas identificadas y no identificadas no presenta cambios significativos, lo cual es un indicador de que las fuentes de emisión son las mismas durante el periodo de muestreo, con algunas variaciones en la magnitud del aporte.

**Gráfica 14. Composición porcentual promedio, estación Tránsito y Barrio la Joya**



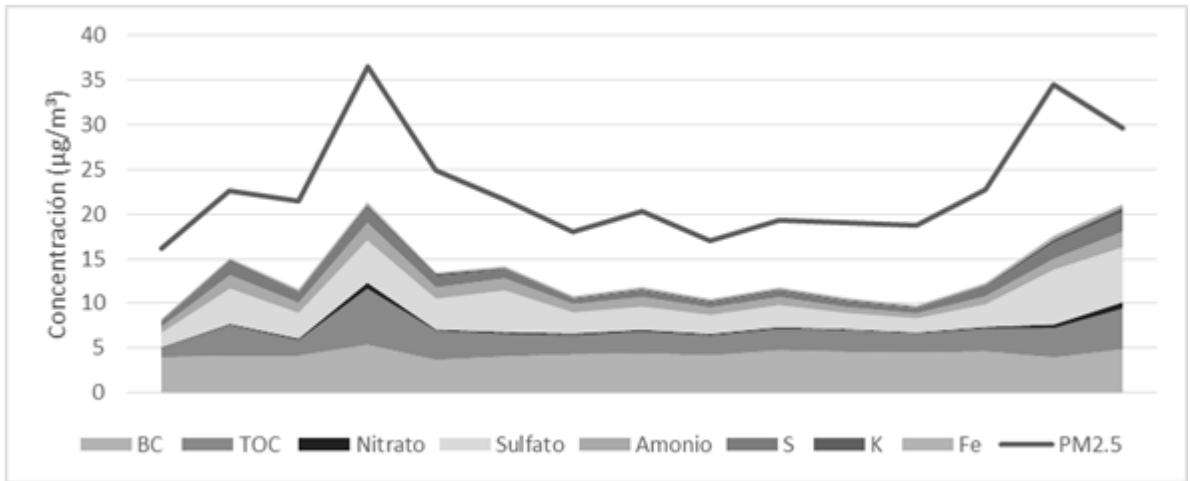
**a) Estación Tránsito**



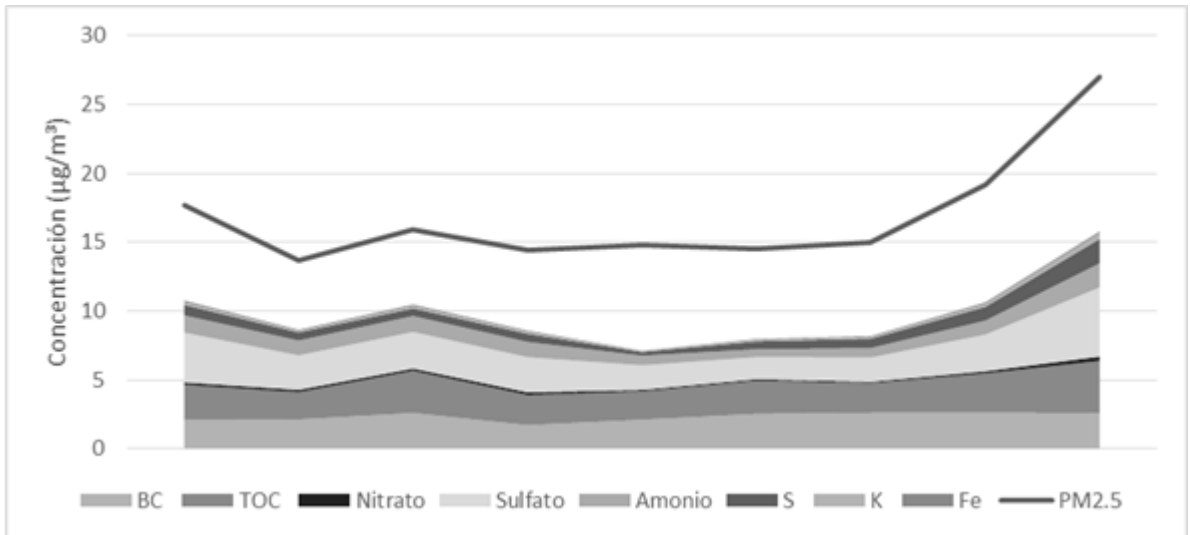
## b) Barrio La Joya

En la gráfica 14 se muestran los porcentajes de composición promedio en cada punto de muestreo, estación Tránsito (a) y barrio La Joya (b), en general presentan un comportamiento similar, la suma entre BC, TOC y aniones, que son los componentes mayoritarios, es igual en ambos puntos de muestreo (47%), sin embargo se puede observar que en la estación de Tránsito el porcentaje de BC y metales es mayor que en el Barrio la joya, esto es resultado de un mayor flujo vehicular y algunas actividades industriales, la proporción de cationes y metales, compuestos minoritarios, (12-13%) y las especies no identificadas (36-37%), este porcentaje es bastante significativo, se atribuye en parte al método de medición que determina elementos en traza y no como óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y  $\text{TiO}_2$ ) que es como se encuentran primordialmente en el ambiente (Balasubramanian et al. 2003), a algunos iones no medidos como  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  los cuales también hacen parte del  $\text{PM}_{2.5}$  (Hueglin et al. 2005), y a los contenidos de agua, hidrogeno y oxígeno relacionados con los compuesto geológicos y orgánicos(Harrison et al. 2003).

**Gráfica 15 Concentración ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) elementos mayoritarios en PM2.5 estación Tránsito y Barrio La Joya.**



a) Estación Tránsito



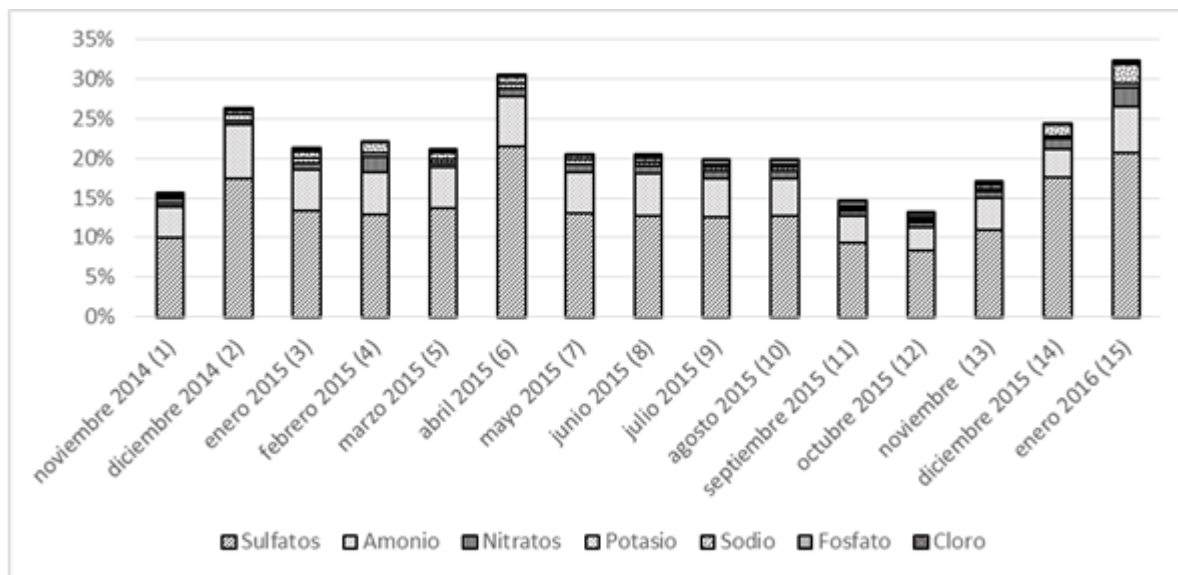
b) Barrio La Joya

La gráfica 15 presenta las concentraciones de los elementos mayoritarios en cada muestra para la estación de Tránsito (a) y barrio La Joya (b), en las cuales se puede observar el importante aporte del BC, TOC, iones como el sulfato y amonio, y el

azufre como elemento en traza, en relación con la concentración total de PM2.5. Estos elementos en su mayoría están relacionados con el flujo vehicular.(Hodan & Barnard 2003)(Zheng et al. 2005).

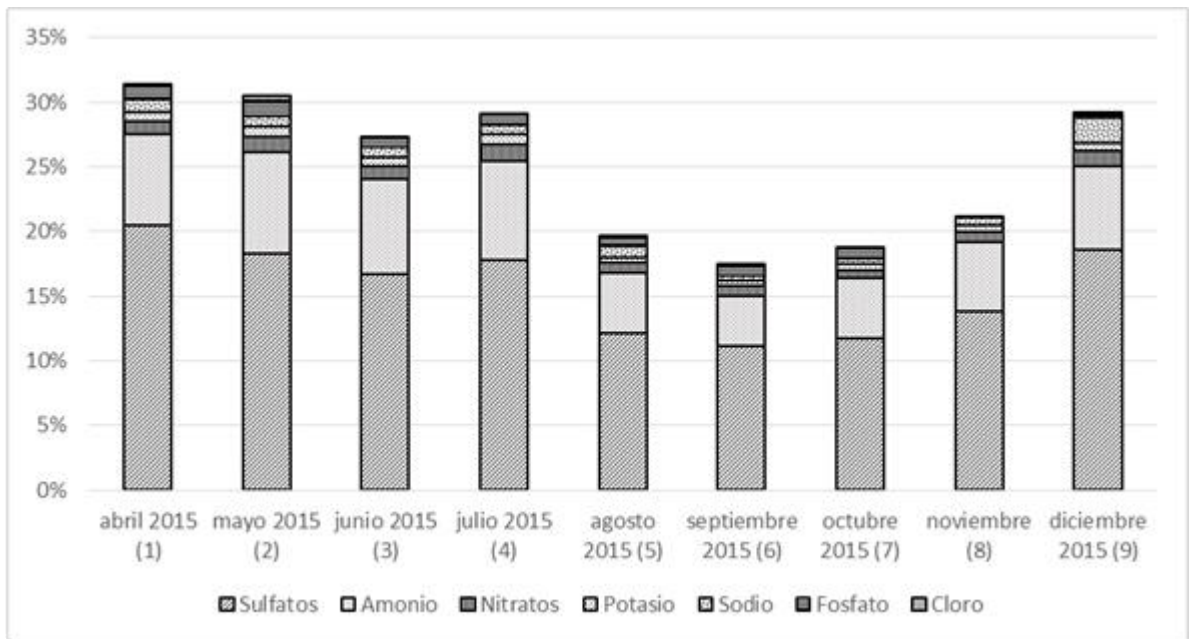
El aporte de la composición iónica en el punto de muestreo de Tránsito está dado principalmente por sulfatos (8-22%), amonio (3-7%) y en menor proporción por nitratos (0,5-2%), potasio y sodio (0,3-1%) los iones de fosfatos y cloro son poco significativos menores al 0,3%. (Ver gráfica 16)

**Gráfica 16. Composición (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5, estación Tránsito**

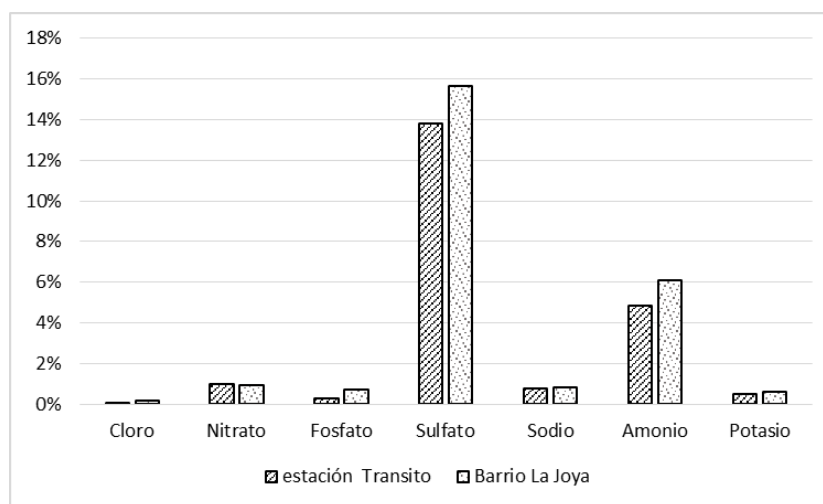


En el barrio La Joya las especies iónicas estuvieron compuestas en mayor cantidad por sulfatos (11-20%), amonio (5-8%) y en menor cantidad por nitratos (< 1%), potasio (0,3-1%), sodio (0.4-2%) y fosfatos (0,1-1%), el porcentaje de ion cloro no fue significativo (<0,1%). (Ver gráfica 17)

**Gráfica 17. Composición (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5, Barrio la Joya**



**Gráfica 18. Composición promedio (%p/p) iones solubles presentes en PM2.5 estación Tránsito, Barrio la Joya**

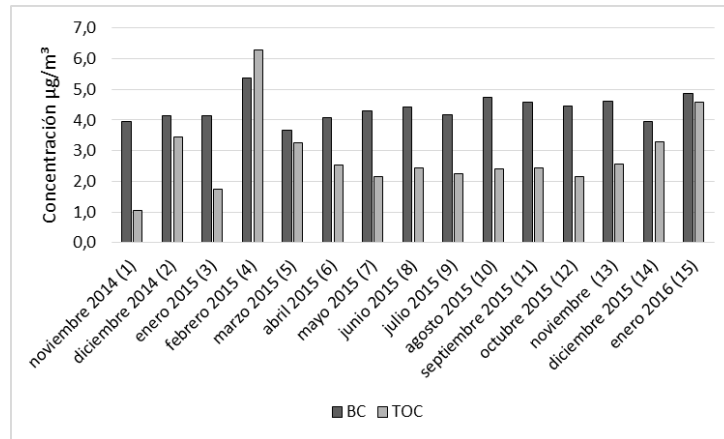


En la gráfica 18 se evidencia que la concentración promedio de iones e PM<sub>2.5</sub> es similar para ambos puntos de muestreo. Los iones sulfato, sodio y nitrato, los cuales fueron tres de los iones que aportaron mayor cantidad de material particulado están relacionados principalmente con la quema de combustibles tanto en vehículos como en actividades industriales y con las reacciones secundarias en la atmósfera, el amonio que fue el segundo ion con mayor aporte de material particulado se relaciona en mayor proporción con actividades agrícolas y en una menor cantidad con la quema de combustibles (Hodan & Barnard 2003).

#### Compuestos carbonáceos

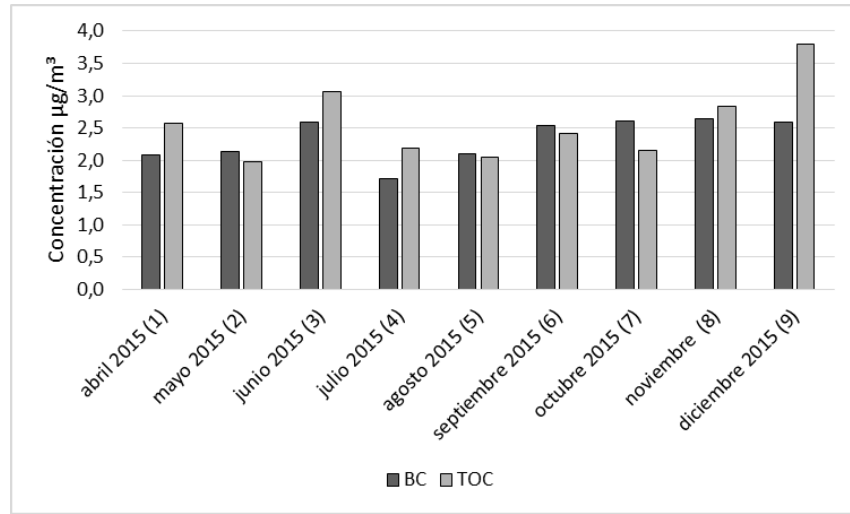
Dentro de las especies químicas identificadas en las muestras de los dos puntos de monitoreo el BC y el TOC fueron dos de los compuestos más representativos, el carbono orgánico contiene compuestos mutagénicos y carcinógenos como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), biclos policlorados (PCBs) y elementos tóxicos, por otra parte el carbono inorgánico o black carbon interviene en las reacciones de formación de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> Y O<sub>3</sub>, considerados compuestos peligrosos para la salud humana (Lee et al. 2012) (Novakov 1984) y por esta razón el estudio de las fuentes de emisión de estos contaminantes es de gran importancia (Hamad et al. 2015). En las gráficas 19 y 20 se presentan la relación entre las concentraciones de BC y TOC durante el periodo de muestreo para cada uno de los puntos.

**Gráfica 19. Concentraciones de BC y TOC en PM2.5, estación Tránsito**



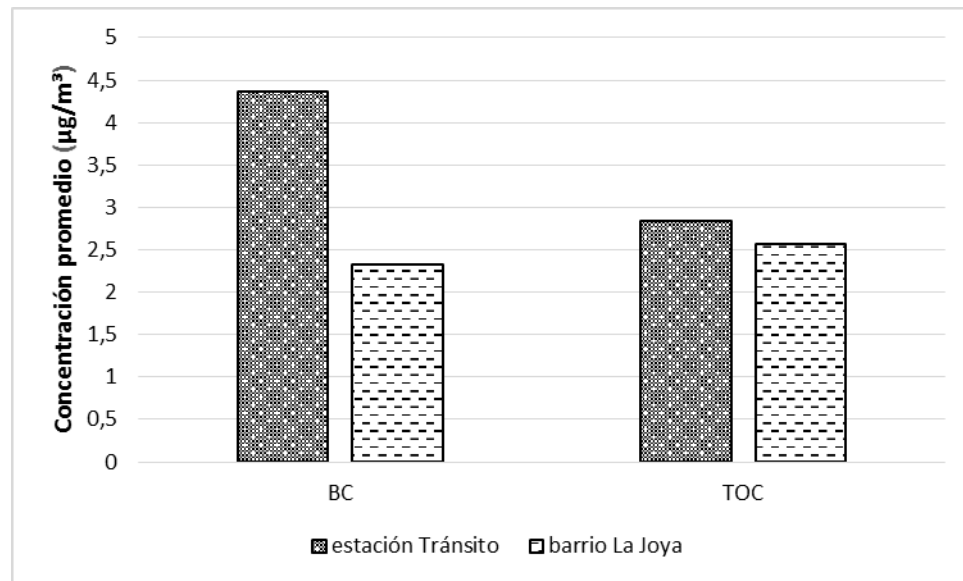
En la gráfica 19 se comparan las concentraciones de BC y TOC en PM2.5 para la estación Tránsito, se observa que la concentración de BC tiene un comportamiento estable, esto se atribuye a la relación de las emisiones de BC con la combustión de diésel (EPA 2012) , ya que en este sector hay gran flujo de vehículos del sistema integrado de transporte METROLINEA y las rutas de servicio público que emplean este tipo de combustible y tienen una frecuencia de circulación establecida, lo que hace que no presenten variaciones significativas en el aporte de PM2.5 a lo largo del tiempo. La concentración de BC es mayor que la concentración de TOC en todas las muestras, a excepción de la muestra 4 donde la concentración de TOC y es mayor que la de BC y en la cual se observa un aumento significativo de ambas contribuciones, este resultado se relaciona con un incendio cercano al punto de muestreo ocurrido en esa fecha (Vanguardia Liberal 2015a)

**Gráfica 20. Concentraciones de BC y TOC, Barrio La Joya**



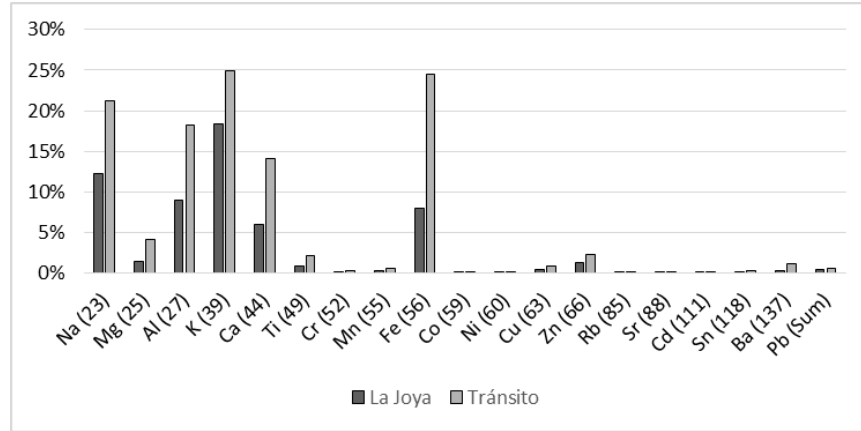
En la gráfica 20 se comparan las concentraciones de BC y TOC en PM<sub>2.5</sub> para el Barrio La Joya, en este caso las concentraciones de BC y TOC son bastante similares, siendo en algunos casos mayor la concentración de BC y en otras la concentración de TOC, las muestras 1,3,8 y 9 que son las que presentan mayor concentración de estos compuestos corresponden a temporadas de vacaciones, tal como se había mencionado en la gráfica 4, esto hace que aumente el flujo de vehículos a gasolina y las emisiones de PM<sub>2.5</sub>.

**Gráfica 21. Concentración promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) BC y TOC presentes en PM2.5 estación tránsito, Barrio la Joya**



La gráfica 21 permite observar que la concentración promedio de BC es mucho mayor en la estación Tránsito que en el Barrio La Joya, este contaminante se relaciona principalmente con la quema de hidrocarburos a altas temperaturas, en especial combustible diesel (Kirchstetter & Novakov 2007), por otra parte, la concentración de TOC es muy similar en ambos puntos, la emisión de carbono orgánico al ambiente se relaciona principalmente con la quema de biomasa y el flujo vehicular. (Hamad et al. 2015)

**Gráfica 22. Composición promedio (%p/p) principales metales presentes en PM2.5, estación Tránsito, Barrio La Joya.**

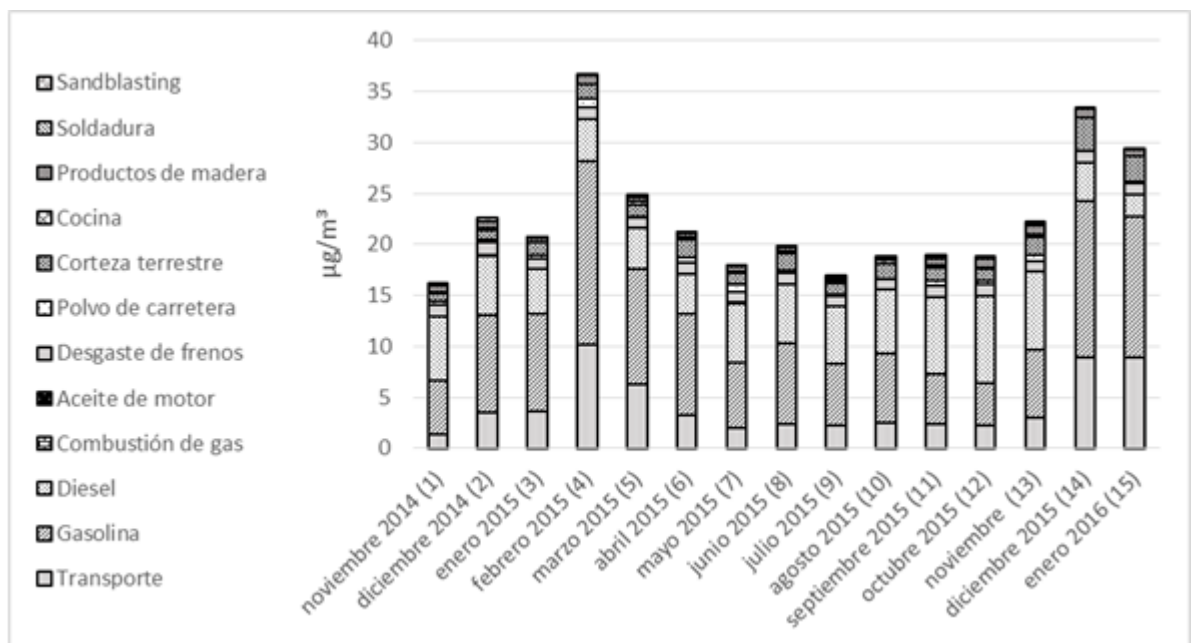


En la gráfica 22 se puede observar que aunque los metales no son la especie que más aporta a la concentración de PM2.5 en los dos puntos de muestreo, esta especie contiene elementos que pueden generar algunas aproximaciones de las fuentes que emiten material particulado, dentro de las fuentes que se relación con la emisión de metales están los vehículos (potasio, cromo, manganeso, hierro, níquel, cobre, zinc, cadmio y plomo) las actividades industriales (sodio, aluminio, potasio, hierro, níquel, cadmio) y el material cristal (magnesio, aluminio, potasio, calcio y titanio)(Rodríguez et al. 2004). Los metales con mayor aporte en los sitios de muestreo son hierro, calcio, sodio, potasio y aluminio, por lo tanto se espera que las fuentes que más aporten metales sean los vehículos y el material cristal.

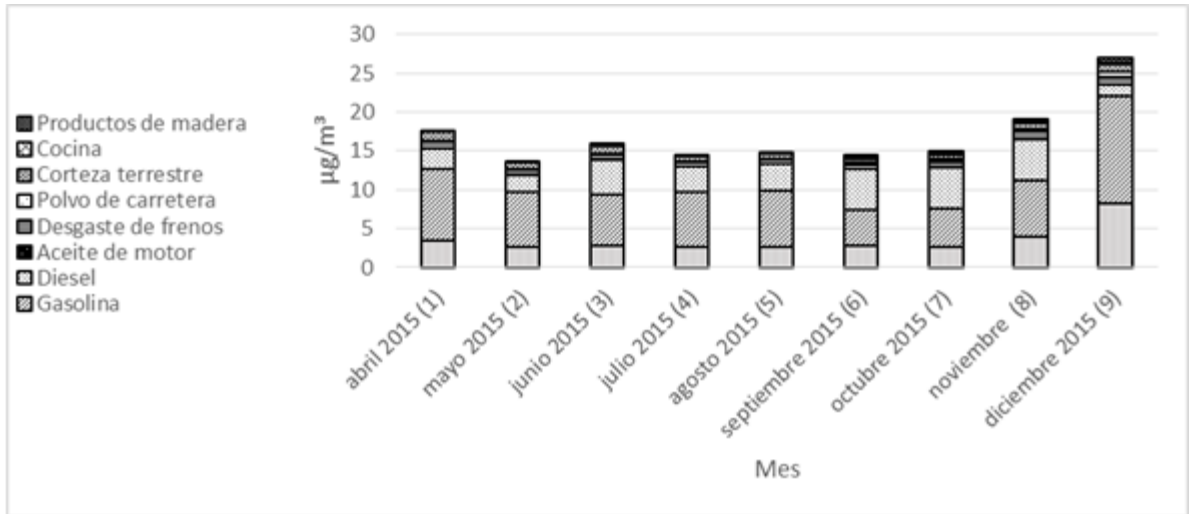
## 5.5 RESULTADOS MODELO DE CORRELACIÓN DE FUENTES CMB

Las 82 fuentes que fueron seleccionadas de acuerdo a las características de los dos sectores de estudio se presentan en el anexo A, de estas el conjunto de fuentes que cumplió con los parámetros de validación establecidos por el modelo ( $0.8 < R^2 < 1$ ,  $0 < \chi^2 < 4$  y  $80 < \%masa < 120$ ) se presenta en el anexo B. Las gráficas 22 y 23 muestran los resultados de las fuentes que aportaron a la concentración de PM<sub>2.5</sub> en cada punto de muestreo.

**Gráfica 23. Aporte ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de fuentes identificadas, estación Tránsito**



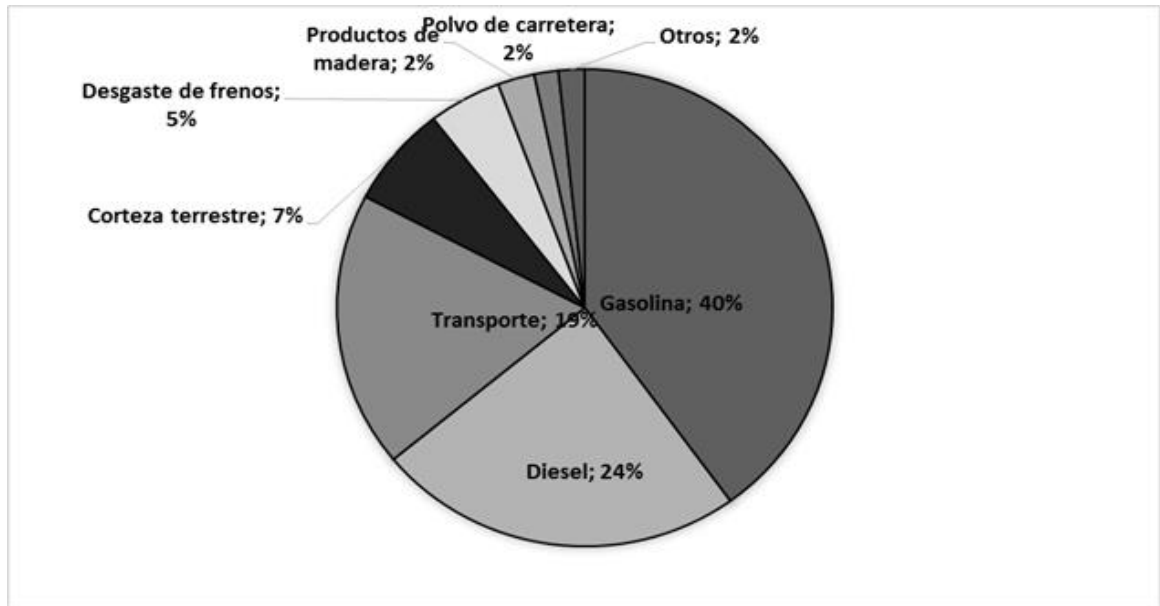
**Gráfica 24. Aporte ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de fuentes identificadas, Barrio la Joya**



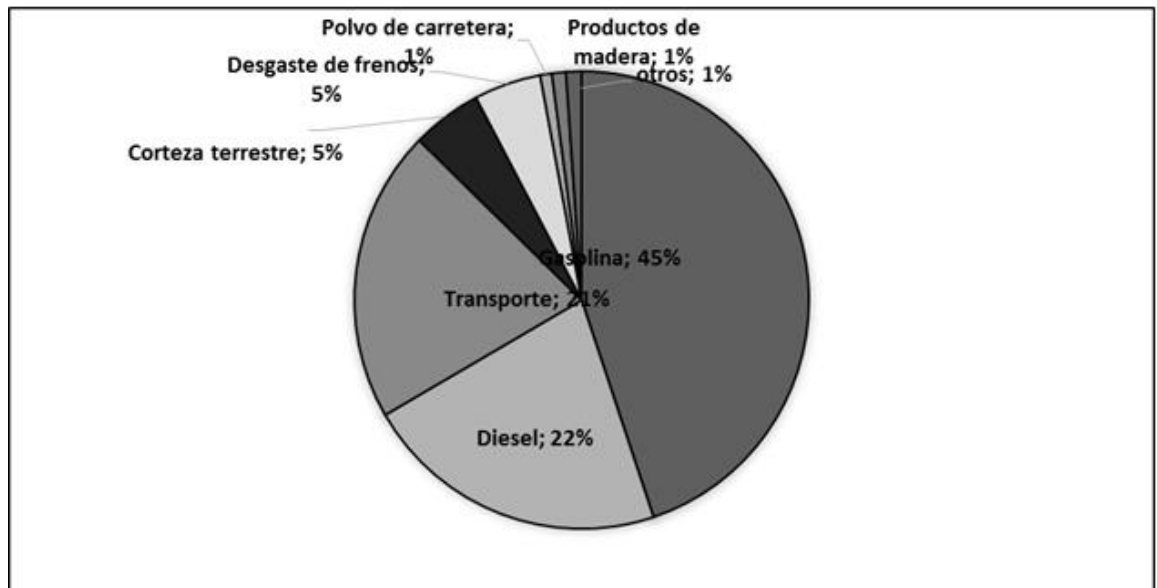
Para el sitio de muestreo de Tránsito, ver gráfica 23, el cual es denominado de alto tráfico vehicular las principales fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub> están directamente relacionadas con el gran movimiento de vehículos en el sector siendo la emisión de vehículos con motor de gasolina la principal fuente de aporte de PM<sub>2.5</sub>, seguido por los vehículos con motor diésel y transporte, fuente que abarca todas la emisiones relacionadas con el flujo vehicular ( motores, frenos y desgaste de neumáticos principalmente), además existen algunas que generan un menor como desgaste de frenos, cocina, aceite de motor, corteza terrestre, soldadura, sandblasting, productos de madera, polvo de carretera y combustión de gas.

En el Barrio la Joya, ver gráfica 24, considerado un sector residencial de bajo tráfico vehicular, las principales fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub> al igual que en la estación de Tránsito son los vehiculos con motor de gasolina, vehiculos con motor diesel y el transporte en general, además otras fuentes que aportan en menor cantidad son la corteza terrestre, cocina, productos de madera, polvo de carretera y algunas otras relacionadas con los vehiculos como el desgaste de frenos y el aceite de motor.

**Gráfica 25. Aporte porcentual promedio de las fuentes identificadas, estación Tránsito y Barrio la Joya.**



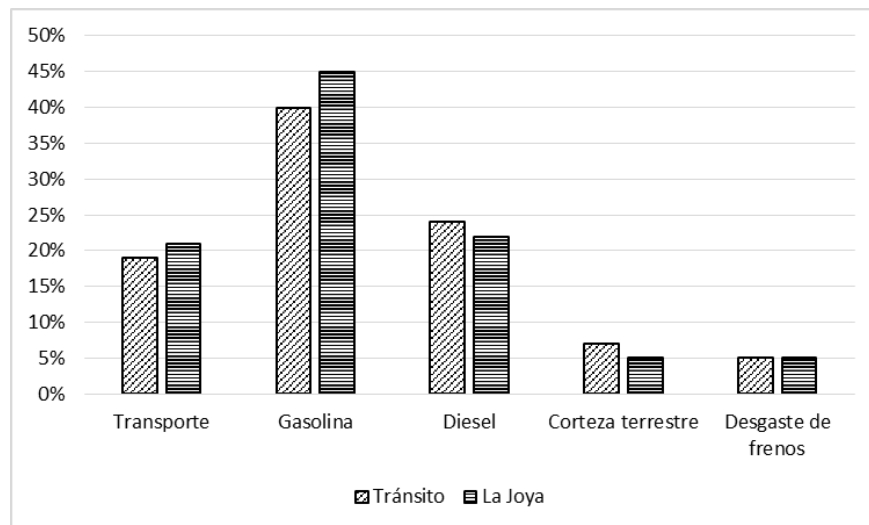
a) Estación Tránsito



b) Barrio La Joya

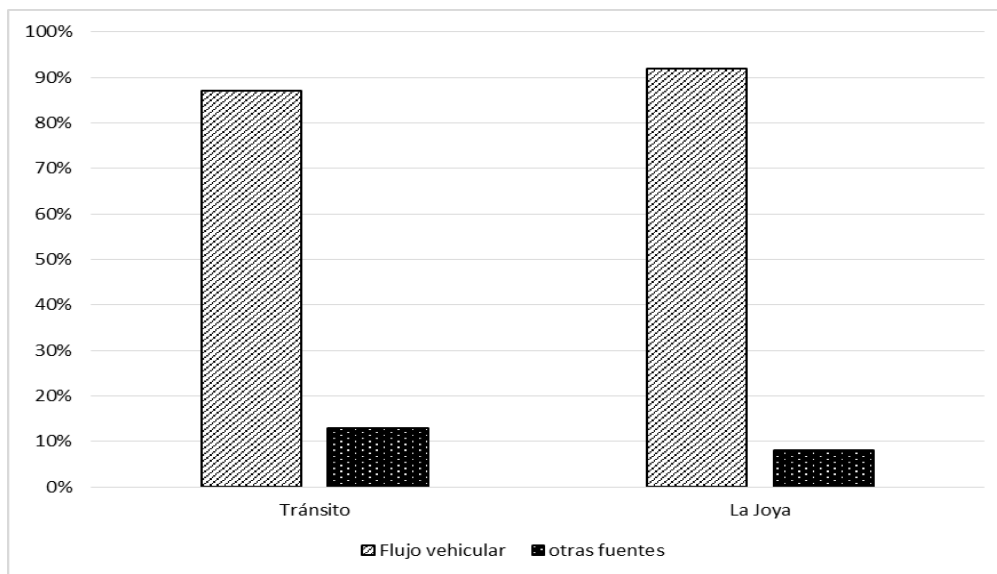
Al realizar el análisis de las fuentes de emisión de PM<sub>2.5</sub> más representativas para los dos sectores de muestreo, gráfica 25, se encuentra en primer lugar la gasolina en un rango entre 40-45% de aporte, seguido por la combustión de motores diesel cuyo aporte oscila entre el 22 y el 24%, el transporte entre 19-21% y la corteza terrestre que se encuentra entre el 5-7%.

**Gráfica 26. Aporte porcentual promedio de las cinco principales fuentes identificadas, estación Tránsito y Barrio la Joya**



Comparando las cinco principales fuentes de material particulado tanto para la estación Tránsito como para el barrio La Joya, gráfica 26, se puede observar que presentan aportes muy similares, siendo la gasolina la principal fuente de material particulado, seguida por el diésel, esto muestra de una forma más clara que el Tránsito de vehículos aporta la mayor parte del material particulado en las dos zonas de estudio alto y bajo tráfico de vehículos.

**Gráfica 27. Aporte porcentual promedio de todas las fuentes relacionadas con el flujo vehicular, estación Tránsito y Barrio la Joya.**



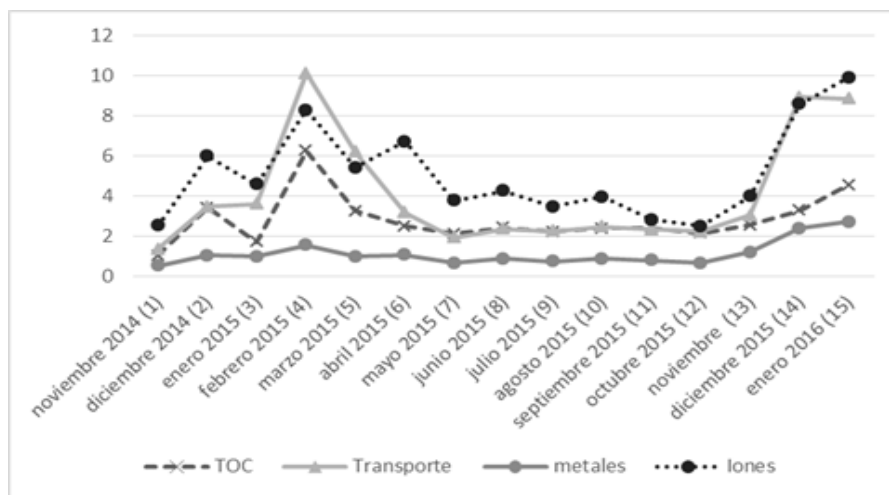
En la gráfica 27 se evidencia claramente que la principal fuente de material particulado para los dos puntos de muestreo es el sector transporte, en el que se incluye las emisiones por motores tanto de diésel como de gasolina, por desgaste de frenos, desgaste de neumáticos y transporte en general.

## **5.6 CORRELACIÓN DEL APOORTE DE LAS PRINCIPALES FUENTES CON LA COMPOSICIÓN FISICOQUÍMICA DE LAS MUESTRAS**

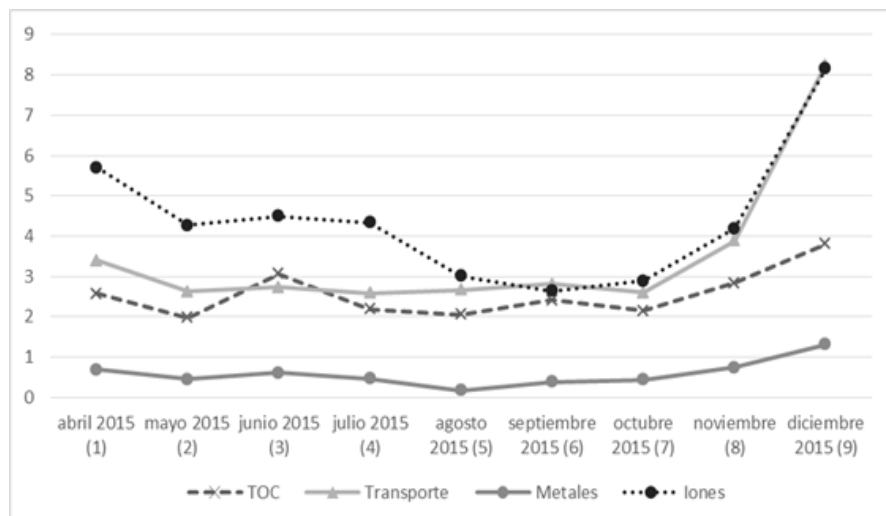
Con el fin de conocer la incidencia de las principales fuentes identificadas sobre la composición del PM<sub>2.5</sub> en cada uno de los puntos de muestreo y de comparar los resultados obtenidos con la bibliografía consultada, se analizó la relación entre las concentraciones de aporte de transporte, gasolina, diésel y corteza terrestre y la concentraciones de BC, TOC y metales en cada una de las muestras, teniendo en cuenta que la concentración de estos elementos usualmente se emplea como

trazador para estimar las fuentes de aporte de material particulado, los resultados se presentan en las gráficas 28, 29, 30 y 31 dado que lo que se quiere observar es la tendencia de las concentraciones a través del tiempo, se emplea una escala arbitraria que facilite su visualización.

**Gráfica 28. Relación entre el aporte de PM2.5 por el transporte y las concentraciones de TOC y metales en las muestras (escala arbitraria)**



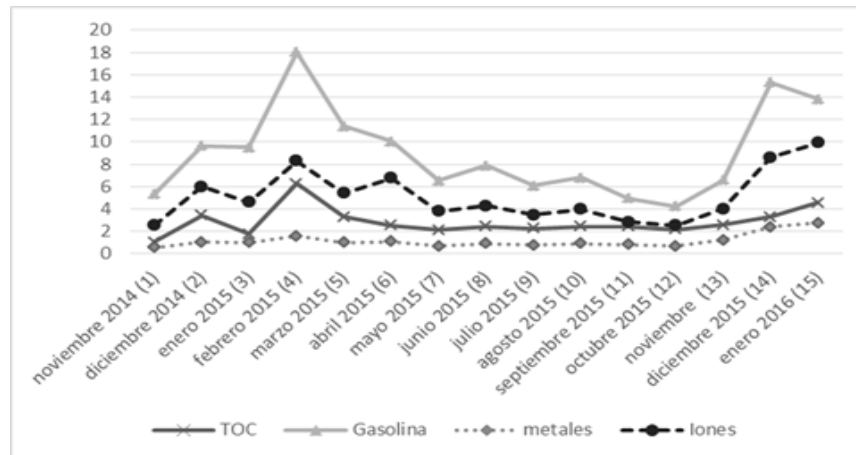
**a) Estación Tránsito**



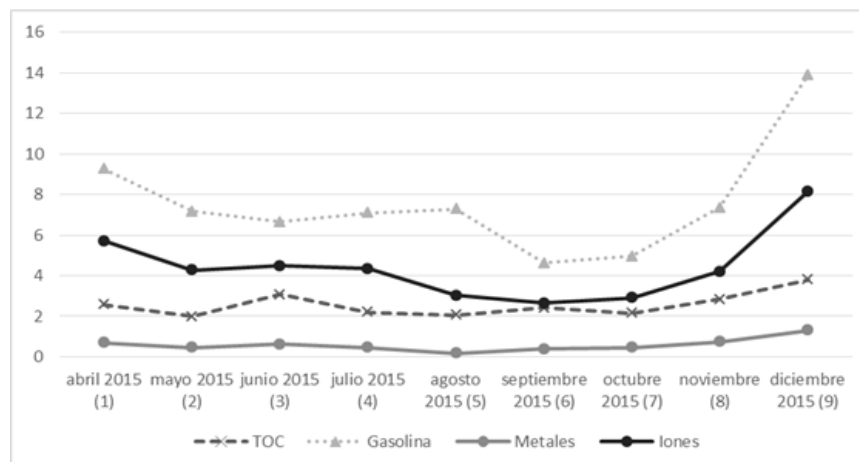
**b) Barrio La Joya**

Las especies que tienen mayor correlación con el aporte del sector transporte tanto la estación de Tránsito como en el Barrio La Joya son el TOC con coeficiente de correlación de Pearson de (0,86 y 0,85), los metales (0,85 y 0,92) y los iones (0,85 y 0,91), respectivamente ,la relación en los tres casos es directa y coincide con diferentes estudios que relacionan las concentraciones de metales, TOC y iones como los sulfatos y los nitratos con el flujo vehicular. (Hodan & Barnard 2003), (Rodriguez et al. 2004),(Zheng et al. 2005),(Cao et al. 2005). (Ver gráfica 28)

**Gráfica 29. Relación entre el aporte de PM2.5 por la combustión de gasolina y las concentraciones de TOC y metales en las muestras (escala arbitraria)**



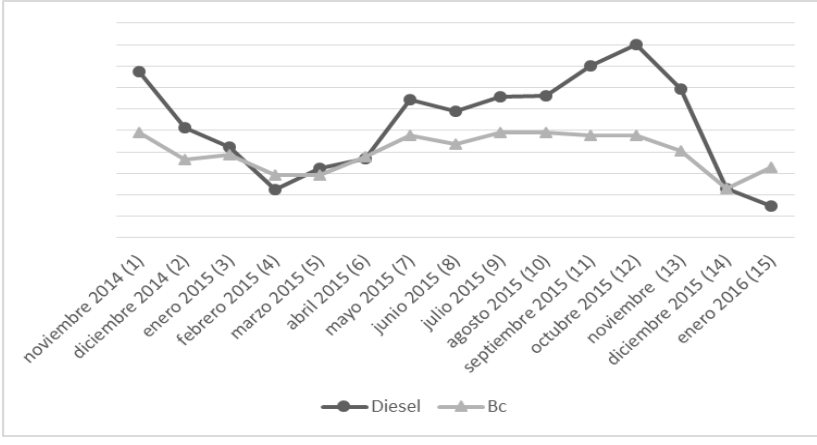
a) Estación Tránsito



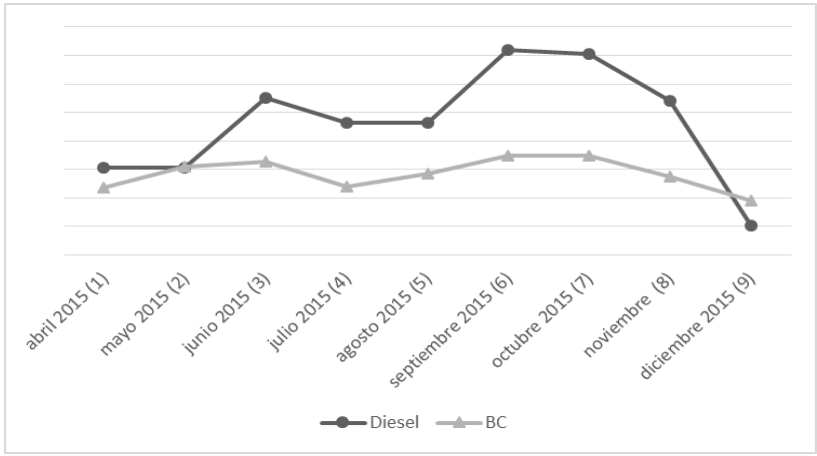
b) Barrio La Joya

El comportamiento del aporte por combustión de gasolina es bastante similar al aporte del sector transporte, en este caso de igual manera las especies que tienen mayor correlación tanto la estación de Tránsito como en la joya son el TOC con coeficiente de correlación de Pearson de (0,84 y 0,72), los metales (0,77 y 0,84) y los iones (0,92 y 0,84) respectivamente. Diferentes autores han relacionado el aporte de la gasolina al contenido de estos elementos en PM<sub>2.5</sub> (Cao et al. 2005) (Shen et al. 2014) (Hamad et al. 2015). (Ver gráfica 29)

**Gráfica 30. Relación entre el aporte de PM<sub>2.5</sub> por la combustión de diésel y las concentraciones de BC en las muestras (escala arbitraria)**



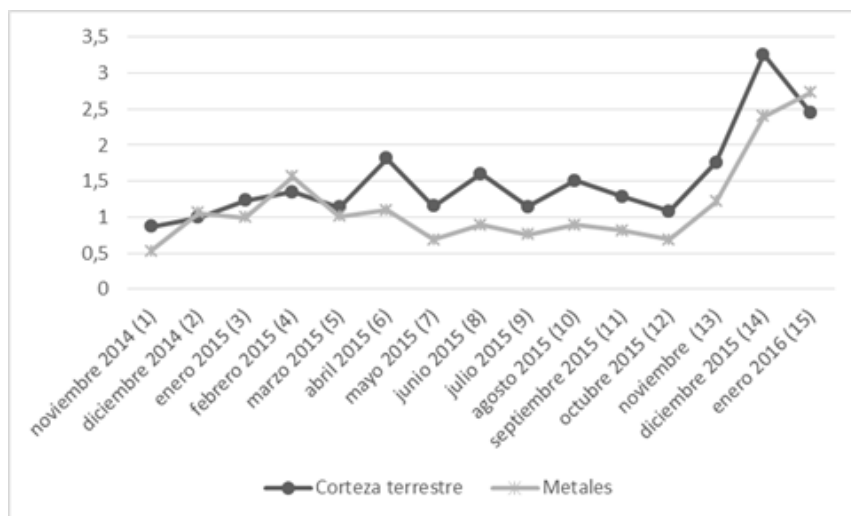
a) Estación Tránsito



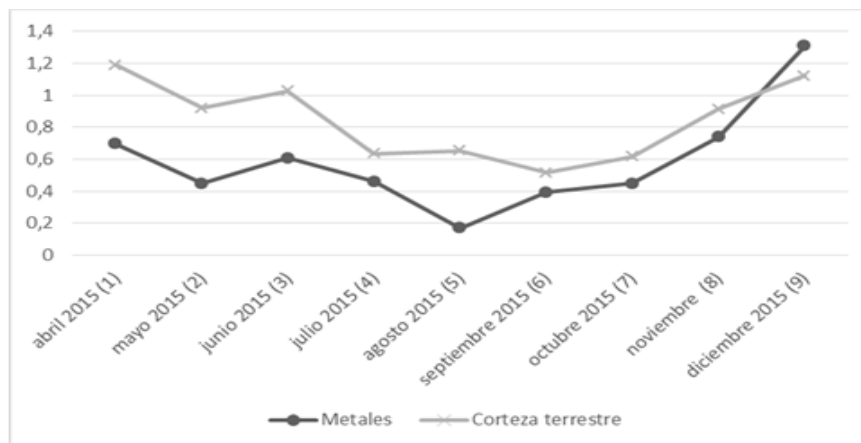
b) Barrio La Joya

Diferentes estudios relacionan la concentración de BC en material particulado con la combustión de diesel (EPA 2012), (Lestari & Mauliadi 2009), (Tunno et al. 2016), en base a los resultados obtenidos se encontro una correlación directa entre el aporte de la combustion de diesel y las concentraciones de BC en las muestras tanto para la estación de Tránsito como para el Barrio La Joya, el coeficiente de correlación de Pearson fue de (0,88 y 0,82) respectivamente. (Ver gráfica 30)

**Gráfica 31. Relación entre el aporte de PM2.5 por compuestos de la corteza terrestre y las concentraciones de metales en las muestras (escala arbitraria)**



a) Estación Tránsito



b) Barrio La Joya

La Gráfica 31 presenta la correlación entre el aporte a las concentraciones de PM2.5 por compuestos provenientes de la corteza terrestres y las concentraciones de metales en cada una de las muestras compuestas, para la estación de Tránsito y el Barrio La Joya el coeficiente de correlación de Pearson fue (0,85 y 0,71) respectivamente. Diferentes estudios relacionan la concentración de metales como magnesio, aluminio, potasio, calcio y titanio) con el material crustal (Rodríguez et al. 2004), (Von Schneidemesser et al. 2010),(Chen et al. 2015).

**Tabla 8. Correlación de los resultados con la bibliografía pertinente**

Titulo	Autor (es)	Año de publicación	Principales fuentes identificadas.
La estimación de incertidumbres y colaboradores de incertidumbre de la CMB Resultados distribución de las fuentes de PM2.5	Sangil Lee, Armistead G Russella	2007	Emisión de motores de vehículos (1-71%), Quema de biomasa (1-64%), polvo (1.54%).
Aporte de fuentes de PM2.5: Comparación de PMF y CMB resultados para cuatro sitios de monitoreo ambiental en el sureste de los Estados Unidos	Sangil Lee, Wei Liu, Yuhang Wang, Armistead G,Russell, Eric S. Edgerton	2008	Motores de vehículos y quema de madera 17-25%, combustión de carbón, polvo producción de metales 6-13%.
Fuentes de altas concentraciones de PM2.5 en Milán, norte de Italia: datos de marcadores moleculares y el modelado CMB	M.G. Perrone, B.R. Larsen, L. Ferrero, G. Sangiorgi, G. De Gennaro, R. Udisti, R. Zangrando, A. Gambaro, E. Bolzacchin.	2012	Tráfico de vehículos 17-24%, Aerosoles inorgánicos 21%, Quema de biomasa 20%.

Título	Autor (es)	Año de publicación	Principales fuentes identificadas.
El análisis de contribución de fuentes de finas (PM <sub>2,5</sub> ) y grueso (PM <sub>2.5e10</sub> ) importa el modo en partículas (PM) se mide en una zona urbana en suroeste de Nigeria	Kayode O. Owoade, Philip K. Hopk, Felix S. Olise, Lanisun O, Adewole. Lasun T Ogundele., Olusegun G. Fawole.	2016	Emisión de vehículos 12%, Quema de sabana 26%, Sal marina 22%, Quema de neumáticos 2%.

La tabla 8 muestra algunos estudios realizados en diferentes lugares del mundo donde se busca identificar las principales fuentes de PM<sub>2.5</sub>, los resultados indican al igual que en esta investigación que en las zonas urbanas el principal aporte de contaminante al aire lo realizan el sector automotor en general, tomando en cuenta que los vehículos generan contaminantes tanto por combustión como por el frenado y el desgaste de los neumáticos por otra parte en la ciudad de Bucaramanga más específicamente en los sectores de muestreo no se encontró la quema de biomasa como una fuente significativa de emisión tal como en los estudios que se relacionan en la tabla 8, esto a causa de que el carbón no es muy usado en la cocina y el sector industrial presente en la ciudad no hace uso de calderas o actividades que involucren la quema de biomasa.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

### 6.1 CONCLUSIONES

- Se identificaron las principales fuentes de emisión de PM2.5 para la estación Tránsito y el Barrio La Joya, obteniendo como resultado que la principal fuente de emisión de PM2.5 es el parque automotor con más de un 85% de incidencia, a este pertenecen fuentes específicas como la combustión de motores de gasolina con un 39% para la estación de Tránsito y un 44% para el Barrio La Joya, seguido por la combustión de motores diésel con 26 y 23% respectivamente.
- En menor cantidad aportaron PM2.5 fuentes como: desgaste de frenos con un 5% para ambos puntos, una fuente definida como transporte la cual incluye todo lo relacionado con el tráfico vehicular aportando el 17% en la estación de Tránsito y 20 % en el Barrio La Joya. La única fuente con un aporte significativo a la concentración de PM2.5, que no está relacionada con el tráfico vehicular, es la corteza terrestre la cual contribuye el 7% para la estación de Tránsito y el 5% en el Barrio La Joya.
- A partir de la caracterización de las muestras compuestas de PM2.5 se estableció que las especies identificadas en mayor concentración son las especies carbonáceas, las cuales se dividen en BC con un 19% para la estación de Tránsito y 14% para el Barrio La Joya, el TOC con un 12 y 15% respectivamente, en segundo lugar los iones sulfato con un 14% en la estación e Tránsito y un 16% en el Barrio La Joya y amonio con un 5% en ambos puntos de muestreo, de los elementos en traza el azufre fue el de mayor concentración con un 4% en los dos puntos.
- Se analizó la variación espacial y temporal de las concentraciones de PM2.5: identificando que la concentración promedio de PM2.5 fue mayor durante todo el

periodo de muestreo en la estación de Tránsito ( $22,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con respecto al Barrio La Joya ( $16,91 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), en ambos puntos la concentración de PM2.5 cumple con la normativa colombiana que establece un valor límite de  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

- Aunque la concentración de PM2.5 es diferente en los dos puntos de muestreo, la composición química de las muestras es muy similar, lo cual indica que el PM2.5 presente en el aire ambiente en un punto no depende solo de las fuentes cercanas, sino que es el resultado del transporte de contaminantes y las diferentes variables que influyen en este.
- La variación temporal es resultado de factores meteorológicos como la velocidad del viento, la precipitación y la humedad relativa, eventos especiales como incendios y cambios en la dinámica vehicular.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Realizar la caracterización fisicoquímica de las emisiones de diferentes fuentes de PM2.5 a nivel nacional, que permita la elaboración de una base de datos con los perfiles de emisión locales necesarios para el modelo CMB, ya que actualmente se emplean los perfiles desarrollados por la EPA en Estados Unidos, lo cual aumenta la incertidumbre de los resultados.
- Revisar la resolución 0610 de 2010, la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, con el fin de disminuir el límite máximo permisible de concentración de PM2.5 a un valor más cercano al recomendado por la OMS y disminuir el riesgo de afectaciones a la salud, ya que actualmente este es 2,5 veces mayor.
- Promover el uso del transporte público con el fin de disminuir la cantidad de vehículos transitan en el área metropolitana de Bucaramanga ya que esta es la principal fuente de emisión de PM2.5.

- Realizar estudios continuos de las emisiones de PM<sub>2.5</sub> en la ciudad con el fin de llevar un control que permita analizar la variación en las concentraciones de este contaminante e implementar alternativas para disminuir los riesgos a la salud.

## BIBLIOGRAFÍA

Aldabe Salinas, J., 2011. Caracterización físico-química del material particulado en la comunidad foral de navarra.

Allen, D., 2002a. Particulate Matter Concentrations, Compositions, and Sources in Southeast Texas: State of the Science and Critical Research Needs.

Allen, D., 2002b. Receptor Modeling | TTN - Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling | US EPA. Available at: <https://www3.epa.gov/scram001/receptorindex.htm> [Accessed February 29, 2016].

Analitycal, O.I., 2011. *Effect of Particulate Matter on Total Organic Carbon (TOC) Analysis of Environmental Water Samples*, TOC.

Areá Metropolitana del Valle de Aburra, 2008. *Evaluación de los niveles de contaminación atmosférica en las zonas urbanas del valle de aburrá*.

Balasubramanian, R. et al., 2003. Comprehensive characterization of PM<sub>2.5</sub> aerosols in Singapore. *Journal of Geophysical Research*, 108(D16), p.4523.

Ban-Weiss, G.A. et al., 2008. Long-term changes in emissions of nitrogen oxides and particulate matter from on-road gasoline and diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 42(2), pp.220–232.

Barrera, L. & Chavez, J., 2016. Determinación de las principales fuentes de material particulado PM2.5 en una zona de alto tráfico vehicular en Bucaramanga mediante la aplicación de modelos de receptores.

Behrentz Valencia, E., Sánchez Morcote, N. & Rivera Contreras, A.J., 2009. *Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá*,

Boldo, E. et al., 2011. Health impact assessment of a reduction in ambient PM2.5 levels in Spain. *Environment International*, 37(2), pp.342–348.

Bruinen de Bruin, Y. et al., 2006. A review of: source apportionment techniques and marker substances available for identification of personal exposure, indoor and outdoor sources of chemicals.

Cao, J.J. et al., 2005. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China. *Atmos. Chem. Phys*, 5, pp.3127–3137.

CDMB, 2014. *Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire-Informe Segundo Trimestre 2014*.

CDMB-, FOSCAL- & OBSERVATORIO DE SALUD PÚBLICA DE SANTANDER, 2010. La Contaminación Atmosférica y sus Efectos en la Salud.

CDMB, FOSCAL & SSAB, 2010. Informe final del convenio especial de cooperación

científica y tecnológica no. 033 de 2009 suscrito entre el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial, la fundación oftalmológica de santander – Clinica Carlos Ardila Lulle (FOSCAL), LA COR. *PhD Proposal*, 1(27), pp.1–125.

CEC, 2008. El mosaico de América del Norte: panorama de los problemas ambientales más relevantes-Partículas suspendidas.

Chan, T.W. & Mozurkewich, M., 2007. Application of absolute principal component analysis to size distribution data: identification of particle origins. *Atmos. Chem. Phys. Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, pp.887–897.

Chen, P. et al., 2015. Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> in Tianjin, China. *Particuology*, 20, pp.104–109. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674200114001540> [Accessed February 25, 2016].

Chuang, C.C. et al., 1997. An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D3), pp.3761–3778. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/96JD03087> [Accessed February 25, 2016].

CONPES 3344, 2005. *Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire*.

Deng, W.-J. et al., 2016. Measurement and health risk assessment of PM<sub>2.5</sub>, flame retardants, carbonyls and black carbon in indoor and outdoor air in kindergartens in Hong Kong. *Environment International*, 96, pp.65–74.

Dimosthenis A. Sarigiannisa, b, Spyros P. Karakitsiosa, b, Marianthi Kermenidoua,

Spyridoula Nikolakia, Dimitrios Zikopoulos, Stauros Semelidis, Apostolos Papagiannakisa, R.T., 2014. Total exposure to airborne particulate matter in cities: The effect of biomass combustion.

Elizabeth Stone a, James Schauer a,\* , T.A.Q. b & Abid Mahmood b, 2009. Chemical characterization and source apportionment of fine and coarse particulate matter in Lahore, Pakistan.

EPA, 2016a. Chemical Mass Balance (CMB) Model | TTN - Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling | US EPA. Available at: [https://www3.epa.gov/scram001/receptor\\_cmb.htm](https://www3.epa.gov/scram001/receptor_cmb.htm) [Accessed September 7, 2016].

EPA, 2016b. Emissions Measurement. Available at: <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/emissions-measurement> [Accessed September 7, 2016].

EPA, 2012. Emissions of Black Carbon. In Report to Congress on Black Carbon. pp. 85–114.

EPA, 2016c. Protocol for Applying and Validating the CMB Model for PM<sub>2.5</sub> and VOC.

EPA, 2016d. Receptor Modeling | TTN - Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling | US EPA. Available at: <https://www3.epa.gov/scram001/receptorindex.htm> [Accessed September 7, 2016].

Feng, J. et al., 2016. Chemical composition and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a heavily polluted city in North China: Fireworks and health risks. *Atmospheric Research*, 182, pp.176–188.

Forero, D. & Delgado, M., 2008. Análisis comparativo de la concentración de

carbono orgánico, carbono elemental contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros entre las áreas metropolitanas de cali y valle de aburrá.

Fujita, E.M. et al., 2007. Evaluations of the chemical mass balance method for determining contributions of gasoline and diesel exhaust to ambient carbonaceous aerosols. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 57(6), pp.721–40.

Gertler, A.W., 2005. Diesel vs. gasoline emissions: Does PM from diesel or gasoline vehicles dominate in the US? *Atmospheric Environment*, 39(13), pp.2349–2355.

Gómez Marín, M., Correa Ochoa, M.A. & Saldarriaga Molina, J.C., 2011. Evaluación del impacto en la concentración del PM2.5 a partir del mejoramiento del combustible en los vehículos.

Hamad, S.H. et al., 2015. Source apportionment of PM2.5 carbonaceous aerosol in Baghdad, Iraq. *Atmospheric Research*, 156, pp.80–90.

Harrison, R.M., Jones, A.M. & Lawrence, R.G., 2003. A pragmatic mass closure model for airborne particulate matter at urban background and roadside sites. *Atmospheric Environment*, 37, pp.4927–4933.

Henry, R.C., 2005. Duality in multivariate receptor models. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 77(1), pp.59–63.

Herrera Montañez, D., 2007. Modelo de emisiones vehiculares para la ciudad de Bogotá (EVB).

Hodan, W.M. & Barnard, W.R., 2011. Evaluating the Contribution of PM2.5 Precursor Gases and Re-entrained Road Emissions to Mobile Source PM2.5

Particulate Matter Emissions.

Hueglin, C. et al., 2005. Chemical characterisation of PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland. *Atmospheric Environment*, 39(4), pp.637–651.

Hwang, I. & Hopke, P.K., 2011. Comparison of Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Using PMF2 and EPA PMF Version 2.

Ibáñez, C.A., 2004. *Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales*, Ministerio de Educación.

Kim Oanh, N.T. et al., 2010. Compositional characterization of PM<sub>2.5</sub> emitted from in-use diesel vehicles. *Atmospheric Environment*, 44(1), pp.15–22.

Kirchstetter, T.W. & Novakov, T., 2007. ARTICLE IN PRESS Controlled generation of black carbon particles from a diffusion flame and applications in evaluating black carbon measurement methods. *Atmospheric Environment*, 41, pp.1874–1888.

Kleeman, M.J., 2003. *Review of source apportionment techniques for airborne particulate matter* /, Sacramento : California Environmental Protection Agency, Air Resources Board, Research Division,.

Kroll, J.H. & Seinfeld, J.H., 2008. Chemistry of secondary organic aerosol: Formation and evolution of low-volatility organics in the atmosphere. *Atmospheric Environment*, 42(16), pp.3593–3624. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008000253> [Accessed September 15, 2015].

Laden, F. et al., 2006. Reduction in fine particulate air pollution and mortality: Extended follow-up of the Harvard Six Cities study. *American journal of respiratory*

*and critical care medicine*, 173(6), pp.667–72. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16424447> [Accessed July 18, 2016].

Lee, J.Y. et al., 2012. Quantification and seasonal pattern of atmospheric reaction products of gas phase PAHs in PM<sub>2.5</sub>. *Atmospheric Environment*, 55, pp.17–25.

Lestari, P. & Mauliadi, Y.D., 2009. Source apportionment of particulate matter at urban mixed site in Indonesia using PMF. *Atmospheric Environment*, 43(10), pp.1760–1770. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008011485> [Accessed February 25, 2016].

Liu, J. et al., 2015. Atmospheric levels and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) bound to PM<sub>2.5</sub> in Guangzhou, China. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), pp.134–143.

Lough, G.C. et al., 2005. Emissions of Metals Associated with Motor Vehicle Roadways. *Environmental Science & Technology*, 39(3), pp.826–836.

MAVDT, 2010a. *Política de prevención y control de la contaminación del aire*

MAVDT, 2006. RESOLUCION 0601 DE 2006:

MAVDT, 2010b. RESOLUCIÓN 0610 DE 2010.

Mészáros, E., 1999. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*, Available at: [http://akkr.hu/3/science\\_books/chemistry/fundamentals\\_of\\_atmospheric\\_aerosol\\_chemistry#prettyPhoto](http://akkr.hu/3/science_books/chemistry/fundamentals_of_atmospheric_aerosol_chemistry#prettyPhoto).

Ministerio Medio Ambiente, 1995. DECRETO 948 DE 1995. *DECRETO*, 948.

Nicolas, M.V.J. et al., 2009. EUROPEAN UNION GERMAN AGENCY FOR TECHNICAL COOPERATION MINISTRY OF FORESTRY AND ESTATE CROPS Fire Management in the Logging Concessions and Plantation Forests of Indonesia.

Novakov, T., 1984. The role of soot and primary oxidants in atmospheric chemistry. *Science of The Total Environment*, 36, pp.1–10. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0048969784902419> [Accessed September 9, 2016].

OMS, 2005. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. *Organización Mundial de la Salud*, p.25. Available at: [http://www.who.int/phe/health\\_topics/outdoorair/outdoorair\\_aqg/es/](http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/es/).

OMS, 2002. Taller sobre contaminación atmosférica causada por vehículos automotores Guía del instructor.

Pathak, R.K. et al., 2011. Characteristics of summertime PM<sub>2.5</sub> organic and elemental carbon in four major Chinese cities: Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC). *Atmospheric Environment*, 45(2), pp.318–325. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231010008836> [Accessed January 8, 2016].

Peña, C.E., Carter, D.E. & Ayala-Fierro, F., 2001. *TOXICOLOGIA AMBIENTAL Evaluacion de Riesgos y Restauracion Ambiental*

Pope, C.A. et al., 2006. Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation*, 114(23), pp.2443–8. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17101851> [Accessed July 18, 2016].

Prospero, J.M., 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the NIMBUS 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics*, 40(1), p.1002.

Pui, D.Y.H., Chen, S.-C. & Zuo, Z., 2014. PM2.5 in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation. *Particuology*, 13, pp.1–26.

Reist, P.C., 1993. *Aerosol science and technology*, McGraw-Hill.

Rodríguez, S. et al., 2004. Comparative PM10–PM2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 328(328), pp.95–113.

Rodríguez, V. & Z, M. del M., 2004. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias.

Rodríguez Villamizar, L.A., Castro Ortiz, H. & Rey Serrano, J.J., 2010. Artículo Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud en Bucaramanga Artículo.

Ruiz Ramos, C.F., 2006. Caracterización del material particulado en las principales vías del transporte público colectivo y masivo del centro de bogotá.

Russell, M. & Allen, D.T., 2004. Seasonal and spatial trends in primary and secondary organic carbon concentrations in southeast Texas. *Atmospheric Environment*, 38(20), pp.3225–3239. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231004002018> [Accessed February 25, 2016].

Ryall, D.. et al., 2002. The origin of high particulate concentrations over the United

Kingdom, March 2000. *Atmospheric Environment*, 36(8), pp.1363–1378. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231001005222> [Accessed February 25, 2016].

Von Schneidemesser, E. et al., 2010. Toxic metals in the atmosphere in Lahore, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 408, pp.1640–1648.

Secretaría de Movilidad de Medellín, 2016. Alcaldía de Medellín adopta medidas para evitar emergencia por calidad del aire - Secretaría de Movilidad de Medellín.

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México, 2011. *Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020*.

Seinfeld, J.H. & Pandis, S., 1998. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Amazon.es: John H. Seinfeld, Spyros N. Pandis: Libros en idiomas extranjeros.

Shen, X. et al., 2014. PM<sub>2.5</sub> emissions from light-duty gasoline vehicles in Beijing, China. *Science of The Total Environment*, 487, pp.521–527.

Shi, L. et al., 2016. Low-concentration PM<sub>2.5</sub> and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effectis un a Populatio-Based Study.

Silva Vinasco, J.P. & Canchala, T., 2013. *Variación espacial y temporal de concentraciones de pm<sub>10</sub> en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia*.

Stone, E. a. et al., 2007. Source apportionment of fine organic aerosol in Mexico City during the MILAGRO Experiment 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7(4), pp.9635–9661.

Tong Zhu, Megan Melamed, D.P., Michael Gauss, Laura Gallardo Klenner, M.L. & Abdourahamane Konare and Cathy Lioussé, 2012. impacts of megacities on air pollution and climate.

Tunno, B.J. et al., 2016. Spatial variation in diesel-related elemental and organic PM<sub>2.5</sub> components during workweek hours across a downtown core. *Science of The Total Environment*, 573, pp.27–38.

Vanguardia Liberal, 2015a. Controlan incendio en la carrera 27 con calle 45 de Bucaramanga. 05/03/2015.

Vanguardia Liberal, 2014. En Bucaramanga hay 2,2 motos por cada carro particular.

Vanguardia Liberal, 2016. Incendio en apartamento del Centro de Bucaramanga generó pánico.

Vanguardia Liberal, 2015b. Seis incendios forestales han arrasado laderas de la meseta de Bucaramanga.

Warn Warneck, P., 1988. Chemistry of the Natural Atmosphere. *Science (New York, N.Y.)*, 242(4875), pp.121–2.

Zárate, E.R. et al., 2002. Determinación de la contribución de fuentes de emisión de pm 2.5 a la atmósfera de la zona metropolitana de la ciudad de México.

Zheng, M. et al., 2005. Seasonal trends in PM<sub>2.5</sub> source contributions in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 39(22), pp.3967–3976



## ANEXO A. Distribución de muestras compuestas

**Tabla A1. Distribución de muestras compuestas, estación Tránsito**

Muestra compuesta	Instalación	Cambio	Masa de PM2.5 (µg)	Volumen muestra (m³)	Concentración de PM2.5 (µg/m³)	Concentración promedio de PM2.5	Masa de PM2.5 por filtro compuesto
1	10/20/2014	10/26/2014	1041.5	61.83	16.8	16.2	6077.0
	10/26/2014	11/1/2014	941.5	60.98	15.4		
	11/1/2014	11/7/2014	976.0	62.42	15.6		
	11/7/2014	11/13/2014	976.0	64.32	15.2		
	11/13/2014	11/19/2014	956.5	62.92	15.2		
	11/19/2014	11/25/2014	1185.5	62.83	18.9		
2	12/7/2014	12/13/2014	982.8	47.79	20.6	23.9	2743.9
	12/13/2014	12/22/2014	1288.4	52.31	24.6		
3	1/19/2015	1/25/2015	1455.5	62.89	23.1	21.4	4235.0
	1/25/2015	1/31/2015	516.5	22.57	22.9		
	1/31/2015	2/6/2015	1076.5	52.31	20.6		
	2/6/2015	2/12/2015	1186.5	61.98	19.1		
4	2/18/2015	2/24/2015	806.5	27.66	29.2	36.0	4152.0
	2/24/2015	3/2/2015	598.5	17.68	33.8		
	3/2/2015	3/14/2015	954.5	25.76	37.1		
	3/14/2015	3/20/2015	929.5	20.19	46.0		
5	3/20/2015	3/26/2015	1669.5	61.44	27.2	24.9	6223.0
	3/26/2015	4/1/2015	1914.0	61.39	31.2		
	4/1/2015	4/7/2015	1251.0	64.27	19.5		
	4/7/2015	4/13/2015	1388.5	63.33	21.9		
6	4/13/2015	4/19/2015	1117.0	67.82	16.5	21.6	6054.5
	4/25/2015	5/1/2015	1499.0	73.24	20.5		
	5/1/2015	5/7/2015	1699.5	70.27	24.2		
	5/7/2015	5/13/2015	1739.0	69.02	25.2		
7	5/13/2015	5/19/2015	1038.5	58.22	17.8	18.1	5252.5
	5/19/2015	5/25/2015	946.0	58.41	16.2		
	5/25/2015	5/31/2015	923.5	58.84	15.7		
	5/31/2015	5/6/2015	1239.5	56.35	22.0		
	6/6/2015	6/12/2015	1105.0	59.38	18.6		
8	6/12/2015	6/18/2015	987	58.84	16.8	20.3	5918.5
	6/18/2015	6/24/2015	1148.5	58.36	19.7		
	6/24/2015	6/30/2015	1037.5	58.75	17.7		
	6/30/2015	7/6/2015	1571.0	59.18	26.5		
	7/6/2015	7/12/2015	1174.5	55.90	21.0		
9	7/12/2015	7/18/2015	952.5	59.80	15.9	17.0	5171.0
	7/18/2015	7/24/2015	899.0	54.76	16.4		
	7/24/2015	7/30/2015	1109.0	62.49	17.7		
	8/5/2015	8/11/2015	1129.5	68.78	16.4		
	8/11/2015	8/17/2015	1081.0	59.04	18.3		
10	8/17/2015	8/23/2015	1221.5	60.09	20.3	19.3	5712.5
	8/23/2015	8/29/2015	1044.0	56.30	18.5		
	8/29/2015	9/4/2015	1176.5	59.95	19.6		
	9/4/2015	9/10/2015	1235.0	59.76	20.7		
	9/10/2015	9/16/2015	1035.5	60.14	17.2		
11	9/16/2015	9/22/2015	957	59.136	16.2	19.1	5627.0
	9/22/2015	9/28/2015	1245	59.76	20.8		
	9/28/2015	10/4/2015	1143	59.472	19.2		
	10/4/2015	10/10/2015	1194	57.072	20.9		
	10/10/2015	10/16/2015	1088	59.664	18.2		
12	10/16/2015	10/22/2015	1112.5	60.576	18.4	18.8	5430.0
	10/22/2015	10/28/2015	908	53.7648	16.9		
	11/3/2015	11/9/2015	1051.5	58.032	18.1		
	11/9/2015	11/15/2015	1241.5	56.88	21.8		
	11/15/2015	11/21/2015	1116.5	58.8	19.0		
13	11/21/2015	11/27/2015	1267	58.848	21.5	22.8	6725.0
	11/27/2015	12/3/2015	1334	59.52	22.4		
	12/3/2015	12/9/2015	1304	59.472	21.9		
	12/9/2015	12/15/2015	1507	57.6	26.2		
	12/15/2015	12/21/2015	1313	60.432	21.7		
14	12/21/2015	12/28/2015	2059.5	70.56	29.2	34.6	10089.0
	1/15/2016	15/01/2016	879	41.472	21.2		
	1/21/2016	1/21/2016	2252.5	57.6	39.1		
	1/27/2016	1/27/2016	2338.5	58.08	40.3		
	2/2/2016	2/2/2016	2559.5	59.52	43.0		
15	08/02/2016	2/8/2016	-4041.5	60.192	27.8	29.7	6797.5
	2/8/2016	2/15/2016	5575	57.456	28.7		
	2/15/2016	2/20/2016	2395	58.944	27.9		
	2/20/2016	2/26/2016	2869	59.424	34.3		

**Tabla A2. Distribución de muestras compuestas, Barrio La Joya**

Muestra compuesta	Intalación	Cambio	Masa de PM2.5 (ug)	Volumen muestra (m³)	Concentración de PM2.5 (ug/m3)	Concentración promedio de PM2.5	Masa de PM2.5 por filtro compuesto
1	4/13/2015	4/19/2015	803.5	68.64	11.7	17.7	4443.0
	4/19/2015	4/25/2015	358.0	36.24	9.9		
	4/25/2015	5/1/2015	992.5	45.64	21.7		
	5/1/2015	5/7/2015	605.5	28.99	20.9		
	5/7/2015	5/13/2015	1683.5	69.12	24.4		
2	5/13/2015	5/19/2015	803.5	57.60	13.9	13.7	3713.5
	5/19/2015	5/25/2015	654.5	57.93	11.3		
	5/25/2015	5/31/2015	417.0	36.04	11.6		
	5/31/2015	5/6/2015	1023.0	57.45	17.8		
	6/6/2015	6/12/2015	815.5	58.89	13.8		
3	6/12/2015	6/18/2015	432	28.03	15.4	15.9	3297.5
	6/18/2015	6/24/2015	390.5	49.72	7.9		
	6/24/2015	6/30/2015	898.5	58.22	15.4		
	6/30/2015	7/6/2015	515.5	23.14	22.3		
	7/6/2015	7/12/2015	1061.0	56.88	18.7		
4	7/12/2015	7/18/2015	753.0	58.46	12.9	14.4	4521.0
	7/18/2015	7/24/2015	890.5	58.89	15.1		
	7/24/2015	7/30/2015	911.5	59.80	15.2		
	8/5/2015	8/11/2015	1041.5	81.07	12.8		
	8/11/2015	8/17/2015	924.5	58.89	15.7		
5	8/17/2015	8/23/2015	957.0	58.94	16.2	14.8	2917.5
	8/23/2015	8/29/2015	769.5	55.87	13.8		
	8/29/2015	9/4/2015	644.0	46.80	13.8		
	9/4/2015	9/10/2015	331.5	23.13	14.3		
	9/10/2015	9/16/2015	215.5	13.53	15.9		
6	9/16/2015	9/22/2015	587	47.04	12.5	14.5	3027.0
	9/22/2015	9/28/2015	947	57.792	16.4		
	9/28/2015	10/4/2015	444	35.328	12.6		
	10/4/2015	10/10/2015	385.5	22.944	16.8		
	10/10/2015	10/16/2015	663.5	46.32	14.3		
7	10/16/2015	10/22/2015	789	46.32	17.0	15.0	3840.5
	10/22/2015	10/28/2015	722	46.272	15.6		
	11/3/2015	11/9/2015	637	57.312	11.1		
	11/9/2015	11/15/2015	966.5	58.128	16.6		
	11/15/2015	11/21/2015	726	49.536	14.7		
8	11/21/2015	11/27/2015	965.5	58.944	16.4	19.2	4530.0
	11/27/2015	12/3/2015	1045.5	58.512	17.9		
	12/3/2015	12/9/2015	1207	59.328	20.3		
	12/9/2015	12/15/2015	1312	59.328	22.1		
9	12/21/2015	12/28/2015	1184	44.88	26.4	27.0	6068.0
	1/15/2016	1/15/2016	2004.5	60	33.4		
	1/21/2016	1/21/2016	879	59.52	14.8		
	1/27/2016	1/27/2016	2000.5	59.52	33.6		

## ANEXO B. Resultados de la caracterización fisicoquímica

**Tabla B1. Concentración de PM2.5, BC y TOC por muestra compuesta, estación Tránsito**

	Muestra compuesta														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PM2.5 (µg/m³)	16.194	22.600	21.439	36.527	24.936	21.600	18.100	20.300	17.000	19.300	19.100	18.800	22.800	34.600	29.700
BC (µg/m³)	3.964	4.132	4.149	5.369	3.662	4.065	4.301	4.425	4.183	4.748	4.569	4.472	4.629	3.951	4.855
TOC (µg/m³)	1.057	3.438	1.741	6.283	3.269	2.527	2.140	2.430	2.242	2.416	2.428	2.156	2.560	3.294	4.573

**Tabla B2. Concentración de iones solubles en agua por muestra compuesta, estación tránsito**

Iones (µg/m³)	Muestra compuesta														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Cloro	0.010	0.003	0.010	0.020	0.004	0.015	0.022	0.020	0.012	0.014	0.013	0.010	0.018	0.041	0.059
Nitrato	0.079	0.135	0.180	0.688	0.154	0.204	0.191	0.190	0.163	0.181	0.122	0.123	0.176	0.414	0.719
Fosfato	0.068	0.037	0.064	0.000	0.050	0.029	0.000	0.075	0.092	0.096	0.085	0.096	0.079	0.000	0.059
Sulfato	1.606	3.963	2.865	4.720	3.443	4.650	2.362	2.587	2.134	2.462	1.798	1.588	2.519	6.126	6.151
Sodio	0.045	0.117	0.186	0.477	0.203	0.197	0.092	0.096	0.070	0.069	0.050	0.044	0.109	0.506	0.709
Amonio	0.651	1.513	1.129	1.965	1.259	1.371	0.942	1.086	0.826	0.912	0.643	0.547	0.905	1.221	1.733
Potasio	0.072	0.245	0.168	0.437	0.312	0.278	0.168	0.221	0.192	0.242	0.138	0.113	0.195	0.303	0.498

**Tabla B3. Concentración de metales por muestra compuesta, estación Tránsito**

Elementos en traza (ng/m <sup>3</sup> )	Muestra compuesta														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Li (7)	0.087	0.152	0.118	0.119	0.104	0.137	0.106	0.142	0.091	0.118	0.093	0.093	0.139	0.232	0.255
Na (23)	47.329	122.845	187.428	441.732	193.842	156.441	66.181	76.216	57.853	60.585	67.141	58.365	141.721	680.839	824.344
Mg (25)	16.357	34.216	35.054	57.139	35.798	39.686	19.105	23.574	24.161	27.439	22.898	16.998	39.698	93.073	126.044
Al (27)	75.997	124.452	128.769	125.134	119.644	240.190	124.583	195.763	140.079	156.808	151.891	102.570	238.902	394.462	411.151
P (31)	18.514	31.085	21.342	19.152	18.504	19.228	21.403	21.996	20.537	23.381	22.986	22.815	29.019	27.513	27.964
S (32)	659.095	1426.384	1092.070	1598.665	1195.634	909.389	571.620	710.671	589.520	646.931	668.957	585.880	1011.289	1736.495	2118.693
K (39)	88.204	254.806	185.071	390.042	328.322	220.251	127.377	182.262	169.880	212.005	160.217	132.740	225.181	469.705	602.782
Ca (44)	83.016	185.378	111.649	111.408	98.950	126.662	89.801	105.761	106.660	124.900	135.374	108.841	204.175	261.358	254.489
Sc (45)	0.013	0.021	0.024	0.022	0.022	0.037	0.021	0.029	0.022	0.024	0.023	0.016	0.050	0.051	0.063
Ti (49)	10.903	17.582	13.898	18.205	13.335	24.015	17.113	23.497	17.769	20.994	17.509	17.363	23.183	35.169	43.411
V (51)	0.461	1.387	1.395	1.630	1.164	0.741	0.390	0.699	0.485	0.501	0.501	0.451	0.880	2.487	2.334
Cr (52)	2.088	2.607	2.065	2.292	1.688	2.004	2.090	2.094	2.083	2.638	2.808	2.575	3.079	2.782	3.162
Mn (55)	5.790	5.703	5.281	5.861	3.758	5.230	5.253	4.569	4.532	5.469	5.218	6.084	6.022	6.638	7.643
Fe (56)	152.971	232.271	267.631	355.857	167.139	233.135	186.506	230.853	189.611	224.131	201.668	187.126	269.849	388.167	385.886
Co (59)	0.098	0.127	0.096	0.096	0.074	0.105	0.092	0.122	0.107	0.119	0.097	0.096	0.136	0.178	0.205
Ni (60)	0.613	0.877	0.784	0.897	0.607	0.656	0.535	0.657	0.547	0.599	0.712	0.691	0.786	1.140	1.298
Cu (63)	6.955	11.357	6.606	6.501	6.856	6.462	6.559	6.463	6.512	7.972	7.922	7.318	9.601	8.236	7.890
Zn (66)	19.526	27.723	27.303	24.909	20.688	18.078	20.282	21.626	20.048	21.319	20.961	24.260	23.197	21.454	24.418
As (75)	0.358	0.645	0.394	0.419	0.373	0.467	0.467	0.482	0.407	0.464	0.421	0.374	0.471	0.440	0.544
Rb (85)	0.238	0.470	0.481	1.014	0.703	0.616	0.340	0.563	0.433	0.609	0.459	0.345	0.621	1.184	1.701
Sr (88)	0.770	1.992	1.082	1.234	1.167	1.368	0.942	1.129	1.070	1.263	1.156	1.017	2.020	3.097	2.635
Y (89)	0.033	0.064	0.051	0.053	0.048	0.084	0.052	0.067	0.051	0.062	0.089	0.045	0.104	0.129	0.161
Nb (93)	0.023	0.033	0.036	0.040	0.031	0.068	0.039	0.059	0.033	0.043	0.036	0.035	0.062	0.111	0.122
Mo (95)	0.351	0.485	0.336	0.329	0.273	0.274	0.342	0.386	0.300	0.368	0.356	0.369	0.408	0.309	0.335
Rh (103)	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
Pd (108)	0.013	0.019	0.015	0.019	0.014	0.031	0.032	0.043	0.034	0.047	0.019	0.012	0.024	0.025	0.032
Ag (109)	0.158	0.278	0.109	0.074	0.066	0.086	0.182	0.087	0.083	0.136	0.125	0.147	0.120	0.089	0.120
Cd (111)	0.117	0.185	0.176	0.469	0.273	0.165	0.170	0.256	0.213	0.330	0.192	0.170	0.215	0.405	0.565
Sn (118)	1.702	1.837	4.375	1.935	1.191	1.116	1.142	1.362	1.237	1.581	1.267	1.501	1.683	1.564	2.261
Sb (121)	2.272	4.789	2.366	1.809	1.893	3.043	2.704	2.319	2.161	2.823	2.739	2.337	3.547	3.408	2.589
Cs (133)	0.008	0.013	0.012	0.016	0.013	0.018	0.012	0.018	0.013	0.016	0.014	0.012	0.020	0.033	0.037
Ba (137)	9.075	17.918	9.005	8.540	8.698	9.808	8.970	9.407	10.263	11.523	10.782	9.403	14.593	15.519	13.018
La (139)	0.097	0.171	0.187	0.208	0.136	0.249	0.125	0.262	0.179	0.238	0.189	0.121	0.256	0.364	0.363
Ce (140)	0.114	0.186	0.179	0.197	0.170	0.308	0.172	0.247	0.173	0.238	0.188	0.142	0.299	0.528	0.581
Pr (141)	0.011	0.020	0.018	0.021	0.017	0.033	0.018	0.025	0.018	0.022	0.020	0.014	0.032	0.055	0.061
Nd (146)	0.041	0.072	0.068	0.079	0.064	0.126	0.068	0.096	0.067	0.086	0.071	0.051	0.118	0.205	0.229
Sm (149)	0.008	0.013	0.012	0.014	0.013	0.023	0.013	0.017	0.012	0.015	0.014	0.009	0.023	0.039	0.043
Eu (151)	0.004	0.008	0.005	0.006	0.005	0.008	0.006	0.008	0.006	0.008	0.006	0.004	0.009	0.012	0.012
Dy (163)	0.006	0.010	0.010	0.010	0.009	0.017	0.010	0.013	0.009	0.011	0.010	0.007	0.017	0.027	0.031
Ho (165)	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.003	0.005	0.006
Yb (173)	0.003	0.006	0.005	0.005	0.005	0.009	0.005	0.007	0.005	0.006	0.006	0.004	0.009	0.014	0.016
Lu (175)	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
W (184)	0.079	0.072	0.044	0.043	0.041	0.053	0.050	0.060	0.045	0.067	0.052	0.058	0.067	0.064	0.071
Pt (195)	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Tl (205)	0.021	0.037	0.028	0.040	0.027	0.024	0.027	0.037	0.025	0.030	0.028	0.028	0.037	0.034	0.043
Pb (210)	4.613	10.096	5.113	5.246	4.155	4.230	3.649	4.242	3.323	5.419	4.104	3.560	4.963	4.968	11.753
Th (232)	0.016	0.028	0.025	0.025	0.023	0.038	0.022	0.031	0.023	0.031	0.029	0.019	0.049	0.058	0.069
U (238)	0.007	0.013	0.010	0.010	0.009	0.015	0.011	0.014	0.009	0.012	0.011	0.010	0.016	0.025	0.023

**Tabla B4. Concentración de PM2.5, BC y TOC por muestra compuesta, Barrio La Joya**

	Muestra compuesta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	17.7	13.7	15.9	14.4	14.8	14.5	15	19.2	27
BC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	2.077918	2.130104	2.594085	1.71425	2.108282	2.53120638	2.61247598	2.63574495	2.58100847
TOC ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	2.56867045	1.98053177	3.06431885	2.19292032	2.05480402	2.41192706	2.15539051	2.83576286	3.80207567

**Tabla B5. Concentración de iones solubles en agua por muestra compuesta, Barrio La Joya**

Iones ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Muestra compuesta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cloro	0.01524203	0.06265121	0.01657726	0.01851258	0.01309072	0.02207129	0.02175846	0.02926128	0.0411257
Nitrato	0.16574755	0.16939432	0.16379774	0.18885288	0.10642794	0.10362422	0.09161356	0.15329134	0.3156579
Fosfato	0.19613914	0.15229269	0.11939975	0.11486468	0.10579598	0.11451115	0.11209924	0	0.08195996
Sulfato	3.62439026	2.50378956	2.66344619	2.5598289	1.79414214	1.61473829	1.76626323	2.66507293	5.02726515
Sodio	0.18189648	0.11335889	0.11634616	0.09771027	0.12539394	0.06361893	0.06799505	0.11033007	0.52063991
Amonio	1.25521274	1.07589735	1.16025955	1.10742842	0.70045089	0.56972498	0.69348392	1.01387444	1.74495732
Potasio	0.25965099	0.188101	0.25300078	0.25467815	0.16714952	0.15100694	0.14121599	0.21849854	0.42395517

**Tabla B6. Concentración de metales por muestra compuesta, estación Tránsito**

Elementos en traza (ng/m <sup>3</sup> )	Muestra compuesta								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li (7)	0.10247555	0.09163378	0.13631389	0.07516426	0.02372936	0.06610505	0.10623617	0.10087417	0.09700066
Na (23)	118.979239	75.2281489	71.3030259	63.2031551	24.3575109	61.2127855	76.8721099	131.73123	481.958238
Mg (25)	19.6924175	10.3226123	15.748591	10.0590968	2.36300468	7.31209292	8.50090914	16.7073181	29.5638695
Al (27)	141.004406	75.2856144	132.620569	72.2935757	17.3838388	50.1237724	62.2027475	119.723488	131.064934
P (31)	16.4343175	19.1401746	16.5810436	17.0059623	8.1029638	17.5908022	20.7468153	25.0149426	19.8105197
S (32)	760.369527	587.289143	550.781083	588.531238	266.271969	563.834098	675.157366	1006.55983	1778.00197
K (39)	203.452744	131.303262	181.52786	166.57459	72.0607389	135.568257	131.170208	226.000022	409.892825
Ca (44)	65.3988632	53.0613866	71.095464	47.386897	15.0126363	49.2781366	58.730849	92.8347288	85.3576966
Sc (45)	0.01928084	0.01378508	0.02653391	0.01289545	0.00136716	0.0105734	0.00927986	0.01591029	0.01747106
Ti (49)	12.5851265	7.54251551	11.1434945	6.54849769	2.64348448	4.344745	6.11262241	8.8014952	12.4866515
V (51)	0.59889774	0.35809078	0.60728258	0.40543045	0.23028152	0.37754479	0.39845667	0.77318426	2.14425976
Cr (52)	0.51374374	0.49281347	0.54782406	0.44685878	0.25562326	0.42713398	0.56166357	0.66179166	0.51537153
Mn (55)	2.21182489	1.92578906	1.91472227	1.52879476	0.8613065	1.39246148	1.9201919	2.17294611	2.17265178
Fe (56)	110.223129	70.5901461	98.8715356	71.6365606	24.9757094	53.8767837	59.3296735	95.8751043	128.543939
Co (59)	0.13103144	0.11179941	0.13315103	0.09849925	0.0636971	0.12359516	0.17954223	0.18033042	0.1798104
Ni (60)	0.34976842	0.34907966	0.38708614	0.33694926	0.15734093	0.3029213	0.34562198	0.45199199	0.70768859
Cu (63)	3.46001681	3.18783825	2.43538309	3.05119418	1.70342058	4.60410654	5.74714241	7.97929752	3.30526237
Zn (66)	8.38103705	10.8653386	9.44365379	10.1487747	4.44126037	14.9055352	23.836514	20.447096	9.66382424
As (75)	0.46457963	0.46197769	0.5971207	0.52872217	0.23497789	0.36041942	0.53463884	0.42327574	0.37645514
Rb (85)	0.56492235	0.34598682	0.50594432	0.44149278	0.16833437	0.3486376	0.36087684	0.52532358	0.91796531
Sr (88)	0.65875793	0.52609546	0.64102053	0.45049661	0.16102439	0.44121651	0.53824869	1.17176538	1.28097989
Y (89)	0.04898205	0.03033389	0.05378018	0.03008002	0.0062262	0.02497134	0.02852778	0.03159854	0.04211354
Nb (93)	0.05029928	0.02469212	0.04089471	0.01828006	0.00744498	0.01383579	0.01711948	0.0293497	0.05135456
Mo (95)	0.1254464	0.17603184	0.20157504	0.14823748	0.07519923	0.15494434	0.21953923	0.20100843	0.14431283
Rh (103)	0.00037019	0.0002601	0.00026945	0.00029127	0.0001967	0.00017333	0.00014698	0.0002306	0.0001394
Pd (108)	0.01487249	0.01094223	0.01553342	0.0114546	0.00490399	0.00549045	0.00589545	0.0065771	0.00880194
Ag (109)	0.41388402	0.59641619	0.23262563	0.34910158	0.15227545	0.5812558	1.18713051	0.41163822	0.31296674
Cd (111)	0.20420992	0.17586971	0.2461795	0.28400019	0.09420201	0.21049624	0.20377009	0.19763533	0.41463124
Sn (118)	1.45017277	0.90632619	1.38848886	0.99612251	0.46128087	0.96765421	1.18254905	1.31966156	1.26102203
Sb (121)	1.3616269	1.69348079	1.34556664	1.57744576	0.82661864	2.59957584	2.66333516	6.26679536	2.91589059
Cs (133)	0.01545897	0.01082651	0.01468984	0.01129932	0.00387211	0.01014804	0.0106938	0.01443091	0.02031908
Ba (137)	2.17428576	2.46640503	2.8337422	2.35138345	0.82975995	2.00259744	2.78224812	5.36342507	4.06195103
La (139)	0.17223209	0.08391221	0.19123037	0.13821217	0.02580197	0.07665176	0.09795336	0.14081364	0.17156735
Ce (140)	0.18558281	0.10407107	0.18121378	0.09805036	0.0220812	0.0679203	0.08689896	0.14386113	0.21260632
Pr (141)	0.02006875	0.01096058	0.02052961	0.01010606	0.00206978	0.00726699	0.00904215	0.01454855	0.02122844
Nd (146)	0.077945	0.042065	0.07612152	0.03964799	0.00823741	0.02829486	0.03400038	0.05263742	0.08055417
Sm (149)	0.01470851	0.00814295	0.01346267	0.00796552	0.0016186	0.00442957	0.00638529	0.01002793	0.01385244
Eu (151)	0.00367761	0.00258848	0.00395817	0.00244587	0.00068634	0.00152518	0.00200057	0.0033661	0.00392828
Dy (163)	0.00963087	0.00611801	0.01067665	0.00544396	0.00121216	0.00388842	0.00475662	0.00610444	0.00883625
Ho (165)	0.00178195	0.00117488	0.00188073	0.00102311	0.0001915	0.00070873	0.00095522	0.00122868	0.00160762
Yb (173)	0.00504663	0.00302059	0.00537244	0.00263752	0.0004642	0.0020855	0.00230702	0.00318937	0.00435685
Lu (175)	0.00067176	0.00042348	0.00075323	0.00037974	7.7838E-05	0.00031351	0.00037103	0.00040598	0.00056168
W (184)	0.01409839	0.01625047	0.01669957	0.0110278	0.00847863	0.02657769	0.02089303	0.02166156	0.01701829
Pt (195)	0.00039986	0.00026269	0.00036174	8.9739E-05	0.00039096	0.00028392	0.00051715	0.0001767	9.3134E-05
Tl (205)	0.02762034	0.03409454	0.04541129	0.03436283	0.01497399	0.03251299	0.04381356	0.04321169	0.03985542
Pb (210)	4.04161051	2.85295255	2.97915537	2.79568019	1.23108908	3.50819419	4.28796557	5.84650812	3.89058087
Th (232)	0.0231252	0.01318795	0.02448257	0.01262885	0.00276462	0.00951709	0.01181289	0.01792293	0.02152306
U (238)	0.01165179	0.00874627	0.01172442	0.00733115	0.00302906	0.00663269	0.00828755	0.01101548	0.01303736

### ANEXO C. Código de fuentes usadas en el modelo CMB

Código	Abreviatura	Nombre
BUC001	BDUST01	Brake Lining Dust – Composite
BUC002	BWEAR01	Brake Wear
BUC003	BWEARLW	Brake Wear - low metallic
BUC004	BWEARAMC	Brake Wear - aramid, mineral, and copper fiber
BUC005	BWEARPAC	Brake Wear - potassium titanate, aramid, and copper fiber
BUC006	BWEARS01	Brake Wear – semimetallic
BUC007	BWEARS02	Brake Wear - semimetallic (steel fiber)
BUC008	CHARBC01	Charbroiling – Composite
BUC009	FDCON1	Construction Dust
BUC010	CONST	Construction Dust
BUC011	CONVID01	Construction Dust
BUC012	CONVTC01	Conventional Gasoline Exhaust
BUC013	BVCAT02	Conventional Diesel Exhaust
BUC014	BVCOOK	Cooking
BUC015	COOKP01	Cooking
BUC016	CRUSTM01	Cooking
BUC017	DIESE01	Cooking potatoes - Deep frying in hydrogenated oil
BUC018	TOS2	Crustal Material – Composite
BUC019	DIESEL01	Diesel Engines
BUC020	DIEST01	Diesel Exhaust
BUC021	DIEST02	Diesel Exhaust
BUC022	ECRUST01	Diesel Exhaust
BUC023	ECRUST02	Diesel Exhaust
BUC024	PCHKG03	Diesel Exhaust
BUC025	PHAUTO	Diesel Exhaust - Transit Bus
BUC026	GASLIGHT	Diesel Exhaust - Transit Bus
BUC027	MUC--CH	Earth's Crust
BUC028	MUO--CC	Earth's Crust
BUC029	RORDFDU	Gas Combustion
BUC030	LDAUTO1	Gasoline Exhaust
BUC031	LDAUTO2	Gasoline Exhaust
BUC032	MECHARE	Gasoline Exhaust – Unleaded
BUC033	MECOCHAR	Gasoline Exhaust – Unleaded
BUC034	MECOFRY	Industrial Dust
BUC035	MOTOR01	Industrial Dust
BUC036	MOTOR02	Light Duty Vehicle Exhaust – Gasoline
BUC037	NGHAPL	Light Duty Vehicle Exhaust – Gasoline

BUC038	PSPR01	Light Duty Vehicle Exhaust – Gasoline
BUC039	PSPR02	Meat charbroiling emissions
BUC040	GCYSTC3	Meat Cooking – Charbroiling
BUC041	RS461	Meat Cooking – Frying
BUC042	RS462	Meat Frying – Composite
BUC043	RNGC01	Motor Oil
BUC044	ROIL01	Motor Oil
BUC045	ROIL02	Natural Gas Home Appliances
BUC046	RFDST	Paint Spray Booth
BUC047	RFDST	Paint Spray Booth
BUC048	SDUST01	Paved Road
BUC049	SDUST02	Paved Road Dust
BUC050	TWEAR01	Paved Road Dust
BUC051	TWEAR02	Paved Road Dust
BUC052	TRANS01	Paved Road Dust
BUC053	TRANS02	Paved Road Dust
BUC054	BVBURN10	Residential Natural Gas Combustion – Composite
BUC055	BVBURN13	Residual Oil Combustion
BUC056	VDRY01	Residual Oil Combustion
BUC057	WOSDUST	Roof Dust
BUC058	RS464	Roof Dust
BUC059	CONST2	Sawdust
BUC060	BVCOOK2	Sawdust
BUC061	DIESEL02	Tire Wear
BUC062	DIESEL03	Tire Wear
BUC063	DIESEL04	Tire Wear
BUC064	RORDFDU2	Tire Wear
BUC065	LDAUTO3	Transportation – Composite
BUC066	RS463	Transportation – Composite
BUC067	RS465	Vegetative Burning
BUC068	RS464	Vegetative Burning
BUC069	TWEAR03	Vegetative Detritus
BUC070	TWEAR04	Veneer Dryer
BUC071	WELDING	Wood Products - Sander dust
BUC072	SANDB	Metal Fabrication – Sandblasting
BUC073	PRDHW	Metal Fabrication – Welding
BUC074	COOKINGG	Cooking
BUC075	LD	Light Duty Vehicle Exhaust – Gasoline
BUC076	SD1	Soil Dust - Sandblasting & Plastering
BUC077	SD2	Soil Dust - Sandblasting & Plastering

BUC078	SD3	Soil Dust – Composite
BUC079	RD1	Road Dirt
BUC080	RD2	Road Dirt
BUC081	MOTOR03	MOTOR03
BUC082	GASOLINA	Gasoline Exhaust
BUC083	FIREWORK	FIREWORK

## ANEXO D. Resultados modelo CMB

### Estación Tránsito

<b>SAMPLE</b>		Site: Muestra1	Date: 41932.00	Duration: 6.	Start Hour: 0.
<b>OPTIONS</b>		Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit	
Maximum Source Uncertainty (%): 20		<input type="checkbox"/> Source Elimination			
Minimum Source Projection: 0.95		Decimal Places Displayed: 5		Species Fit Array: 1	
Units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$				Sources Fit Array: 1	
FITTING STATISTICS:					
R SQUARE	1.00	% MASS	83.4		
CHI SQUARE	0.31	DEGREES FREEDOM	15		
SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:					
SOURCE	EST CODE	NAME	SCE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Std Err	Tstat
YES	BUC001	BDUST01	-1.91665	0.87714	-2.18510
YES	BUC002	BWEAR01	1.41889	0.59911	2.36831
YES	BUC005	BWEARPAC	0.03189	0.06878	0.46374
YES	BUC007	BWEARS02	-0.51153	0.17241	-2.96701
YES	BUC019	DIESEL01	8.56583	1.71556	4.99304
YES	BUC022	ECRUST01	1.18274	0.11243	10.51946
YES	BUC024	PCHKG03	-0.00085	0.03463	-0.02449
YES	BUC026	GASLIGHT	-0.00518	0.03054	-0.16964
YES	BUC030	LDAUTO1	6.96859	1.11289	6.26171
YES	BUC033	MECOCHAR	-0.65665	1.09891	-0.59755
YES	BUC034	MECOFRY	0.14424	0.24428	0.59048
YES	BUC036	MOTOR01	-0.01711	0.00427	-4.01111
YES	BUC041	GCYSTC3	-0.74756	0.21980	-3.40114
YES	BUC050	SDUST02	-2.82312	1.28495	-2.19706
YES	BUC054	TRANS02	1.87057	0.39690	4.71294
YES	BUC059	WSDUST	0.76868	0.59246	1.29744
YES	BUC061	CONST2	-0.23944	0.11251	-2.12820
YES	BUC071	RS465	-0.90799	0.79839	-1.13728
YES	BUC073	TWEAR04	-0.76144	0.23332	-3.26353
YES	BUC074	WELDING	0.06679	0.02249	2.96923
YES	BUC075	SANDB	0.28788	0.07446	3.86623
YES	BUC076	PRDHW	0.49449	0.36096	1.36995
YES	BUC084	MOTOR03	0.00446	0.08418	0.05298
YES	BUC086	GASOLINA	0.28641	0.14923	1.91931

**SAMPLE** Site: Muestra5 Date: 42083.00 Duration: 4. Start Hour: 0.

**OPTIONS** Iteration Delta: 20  Britt-Luecke  Best Fit  
Maximum Source Uncertainty (%): 20  Source Elimination  
Minimum Source Projection: 0.95  
Decimal Places Displayed: 5 Species Fit Array: 1  
Units: µg/m³ Sources Fit Array: 1

---

**FITTING STATISTICS:**

R SQUARE	0.99	% MASS	92.3
CHI SQUARE	0.58	DEGREES FREEDOM	15

**SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:**

SOURCE EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat
YES BUC001	BDUST01	-2.17903	1.43689	-1.51649
YES BUC002	BWEAR01	1.54988	0.96622	1.60407
YES BUC005	BWEAR02	0.01061	0.10765	0.09852
YES BUC007	BWEAR02	-0.55846	0.27581	-2.02477
YES BUC019	DIESEL01	6.03247	2.73603	2.20482
YES BUC022	ECRUST01	1.70049	0.17070	9.96176
YES BUC024	PCHKG03	-0.00380	0.03145	-0.12078
YES BUC026	GASLIGHT	-0.00774	0.04958	-0.15608
YES BUC030	LDAUT01	17.01489	1.96226	8.67105
YES BUC033	MECOCHAR	-0.32591	1.69205	-0.19261
YES BUC034	MECOFRY	0.53612	0.25991	2.06273
YES BUC036	MOTOR01	-0.02780	0.00793	-3.50628
YES BUC041	GCYSTC3	-0.66028	0.54344	-1.21501
YES BUC050	SDUST02	-7.32851	2.25009	-3.25699
YES BUC054	TRANS02	9.35654	1.06498	8.78565
YES BUC059	WSDUST	0.51265	0.95298	0.53795
YES BUC061	CONST2	-0.12317	0.19310	-0.63789
YES BUC071	RS465	-0.92151	1.19175	-0.77324
YES BUC073	TWEAR04	-2.22033	0.66280	-3.34993
YES BUC074	WELDING	0.05895	0.02947	2.00028
YES BUC075	SANDB	0.31922	0.13842	2.30617
YES BUC076	PRDHW	0.16113	1.04312	0.15447
YES BUC084	MOTOR03	0.04008	0.10923	0.36690
YES BUC086	GASOLINA	0.08166	0.23630	0.34556

**SAMPLE** Site: Muestra10 Date: 42228.00 Duration: 5. Start Hour: 0.

**OPTIONS** Iteration Delta: 20  Britt-Luecke  Best Fit  
Maximum Source Uncertainty (%): 20  Source Elimination  
Minimum Source Projection: 0.95  
Decimal Places Displayed: 5 Species Fit Array: 1  
Units: µg/m³ Sources Fit Array: 1

---

**FITTING STATISTICS:**

R SQUARE	0.96	% MASS	88.4
CHI SQUARE	3.14	DEGREES FREEDOM	15

**SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:**

SOURCE EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat
YES BUC001	BDUST01	-3.04698	1.07638	-2.83076
YES BUC002	BWEAR01	2.15413	0.72774	2.96002
YES BUC005	BWEAR02	0.02417	0.08284	0.29172
YES BUC007	BWEAR02	-0.75710	0.20806	-3.63882
YES BUC019	DIESEL01	9.13395	2.17095	4.20735
YES BUC022	ECRUST01	2.21276	0.17715	12.49100
YES BUC024	PCHKG03	0.00363	0.03349	0.10853
YES BUC026	GASLIGHT	-0.00965	0.03787	-0.25479
YES BUC030	LDAUT01	9.72365	1.45459	6.68479
YES BUC033	MECOCHAR	-0.22025	1.31497	-0.16749
YES BUC034	MECOFRY	0.48065	0.27336	1.75833
YES BUC036	MOTOR01	-0.01895	0.00566	-3.34678
YES BUC041	GCYSTC3	-0.69823	0.38177	-1.82892
YES BUC050	SDUST02	-4.83256	1.61307	-2.99589
YES BUC054	TRANS02	3.63226	0.70957	5.11894
YES BUC059	WSDUST	0.35203	0.74476	0.47267
YES BUC061	CONST2	-0.15529	0.15566	-0.99766
YES BUC071	RS465	-0.29566	0.98035	-0.30159
YES BUC073	TWEAR04	-0.94524	0.31499	-3.00082
YES BUC074	WELDING	0.06803	0.02533	2.68570
YES BUC075	SANDB	0.23277	0.09652	2.41159
YES BUC076	PRDHW	-0.15603	0.71660	-0.21774
YES BUC084	MOTOR03	-0.11511	0.09950	-1.15698
YES BUC086	GASOLINA	0.28463	0.18786	1.51509

<b>SAMPLE</b>	Site: muestra15	Date: 42233.00	Duration: 6.	Start Hour: 0.
<b>OPTIONS</b>	Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit	
	Maximum Source Uncertainty (%): 20	<input type="checkbox"/> Source Elimination		
	Minimum Source Projection: 0.95			
	Decimal Places Displayed: 5	Species Fit Array: 1		
	Units: µg/m³	Sources Fit Array: 1		
<b>FITTING STATISTICS:</b>				
R SQUARE	0.99	% MASS	110.4	
CHI SQUARE	0.80	DEGREES FREEDOM	15	
<b>SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:</b>				
SOURCE				
EST CODE	NAME	SCE(µg/m³)	Std Err	Tstat
YES BUC001	BDUST01	-4.67287	2.54105	-1.83895
YES BUC002	BWEAR01	3.25317	1.72927	1.88124
YES BUC005	BWEARPAC	0.15146	0.18013	0.84083
YES BUC007	BWEARS02	-1.11937	0.52718	-2.12331
YES BUC019	DIESEL01	4.96484	4.04633	1.22700
YES BUC022	ECRUST01	5.62349	0.41199	13.64955
YES BUC024	PCHKG03	0.00665	0.08259	0.08055
YES BUC026	GASLIGHT	-0.00612	0.08350	-0.07335
YES BUC030	LDAUTO1	30.36462	3.06570	9.90463
YES BUC033	MECOCHAR	-1.33225	2.81255	-0.47368
YES BUC034	MECOFRY	0.06187	0.45042	0.13736
YES BUC036	MOTOR01	0.01567	0.01623	0.96563
YES BUC041	GCYSTC3	-1.99718	0.96310	-2.07371
YES BUC050	SDUST02	-19.66384	4.20151	-4.68018
YES BUC054	TRANS02	20.34437	2.11054	9.63943
YES BUC059	WOSDUST	1.38294	1.69930	0.81383
YES BUC061	CONST2	-0.31012	0.33020	-0.93920
YES BUC071	RS465	-0.69057	1.54153	-0.44798
YES BUC073	TWEAR04	-5.40700	1.52471	-3.54625
YES BUC074	WELDING	0.03499	0.06167	0.56740
YES BUC075	SANDB	-0.18768	0.26373	-0.71162
YES BUC076	PRDHW	0.43595	1.78917	0.24366
YES BUC084	MOTOR03	0.13609	0.12829	1.06080
YES BUC086	GASOLINA	1.40791	0.59974	2.34755

Barrio La Joya

<b>SAMPLE</b>	Site: Muestra1	Date: 41932.00	Duration: 5.	Start Hour: 0.
<b>OPTIONS</b>	Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit	
	Maximum Source Uncertainty (%): 20	<input type="checkbox"/> Source Elimination		
	Minimum Source Projection: 0.95			
	Decimal Places Displayed: 5	Species Fit Array: 1	Sources Fit Array: 1	
	Units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
<b>FITTING STATISTICS:</b>				
R SQUARE	0.95	% MASS	82.1	
CHI SQUARE	2.54	DEGREES FREEDOM	17	
<b>SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:</b>				
SOURCE EST CODE	NAME	SCE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Std Err	Tstat
YES BUC001	BDUST01	-1.85907	0.95260	-1.95157
YES BUC002	BWEAR01	1.36723	0.63768	2.14408
YES BUC005	BWEARPAC	0.03888	0.07530	0.51641
YES BUC007	BWEARS02	-0.54059	0.17927	-3.01559
YES BUC019	DIESEL01	3.93385	2.11594	1.85915
YES BUC022	ECRUST01	1.73334	0.14602	11.87047
YES BUC024	PCHKG03	-0.00128	0.01894	-0.06732
YES BUC026	GASLIGHT	0.02569	0.04389	0.58526
YES BUC030	LDAUTO1	13.13442	1.46397	8.97179
YES BUC033	MECOCHAR	-0.68576	1.15228	-0.59514
YES BUC034	MECOFRY	0.26507	0.16727	1.58470
YES BUC036	MOTOR01	-0.01038	0.00469	-2.21292
YES BUC041	GCYSTC3	-0.34788	0.37327	-0.93198
YES BUC050	SDUST02	-5.50950	1.47650	-3.73147
YES BUC054	TRANS02	4.94676	0.68846	7.18526
YES BUC059	WOSDUST	-0.22738	0.68333	-0.33275
YES BUC061	CONST2	-0.12755	0.13712	-0.93023
YES BUC071	RS465	-0.59391	0.82619	-0.71886
YES BUC073	TWEAR04	-1.12940	0.36160	-3.12337
YES BUC076	PRDHW	-0.22762	0.71463	-0.31851
YES BUC084	MOTOR03	-0.00335	0.07663	-0.04372
YES BUC086	GASOLINA	0.35959	0.18516	1.94199

<b>SAMPLE</b>	Site: Muestra3	Date: 42023.00	Duration: 5.	Start Hour: 0.
<b>OPTIONS</b>	Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit	
	Maximum Source Uncertainty (%): 20	<input type="checkbox"/> Source Elimination		
	Minimum Source Projection: 0.95			
	Decimal Places Displayed: 5	Species Fit Array: 1	Sources Fit Array: 1	
	Units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$			
<b>FITTING STATISTICS:</b>				
R SQUARE	0.93	% MASS	99.6	
CHI SQUARE	3.16	DEGREES FREEDOM	17	
<b>SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:</b>				
SOURCE EST CODE	NAME	SCE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Std Err	Tstat
YES BUC001	BDUST01	-2.03630	0.88293	-2.30631
YES BUC002	BWEAR01	1.47866	0.59297	2.49367
YES BUC005	BWEARPAC	0.02852	0.07104	0.40142
YES BUC007	BWEARS02	-0.58702	0.16503	-3.55716
YES BUC019	DIESEL01	7.13038	2.34059	3.04640
YES BUC022	ECRUST01	1.66477	0.15034	11.07358
YES BUC024	PCHKG03	-0.00022	0.02506	-0.00888
YES BUC026	GASLIGHT	0.02048	0.03876	0.52853
YES BUC030	LDAUTO1	10.36942	1.41994	7.30270
YES BUC033	MECOCHAR	-0.76787	1.10864	-0.69263
YES BUC034	MECOFRY	0.28703	0.22628	1.26849
YES BUC036	MOTOR01	-0.01095	0.00455	-2.40468
YES BUC041	GCYSTC3	-0.49185	0.36509	-1.34720
YES BUC050	SDUST02	-4.58005	1.40364	-3.26299
YES BUC054	TRANS02	3.71550	0.63391	5.86128
YES BUC059	WOSDUST	-0.11107	0.67461	-0.16464
YES BUC061	CONST2	-0.10113	0.14254	-0.70949
YES BUC071	RS465	0.72102	0.92490	0.77956
YES BUC073	TWEAR04	-0.86404	0.29183	-2.96080
YES BUC076	PRDHW	-0.08267	0.68643	-0.12043
YES BUC084	MOTOR03	-0.29862	0.11085	-2.69385
YES BUC086	GASOLINA	0.37947	0.17925	2.11703

<b>SAMPLE</b>	Site: muestra7	Date: 42085.00	Duration: 7.	Start Hour: 0.	
<b>OPTIONS</b>	Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit		
	Maximum Source Uncertainty (%): 20	<input type="checkbox"/> Source Elimination			
	Minimum Source Projection: 0.95				
	Decimal Places Displayed: 5	Species Fit Array: 1			
	Units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sources Fit Array: 1			
<b>FITTING STATISTICS:</b>					
	R SQUARE	0.98	% MASS	85.8	
	CHI SQUARE	1.07	DEGREES FREEDOM	17	
<b>SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:</b>					
SOURCE	EST CODE	NAME	SCE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Std Err	Tstat
YES	BUC001	BDUST01	-1.59886	0.73252	-2.18269
YES	BUC002	BWEAR01	1.15555	0.49540	2.33257
YES	BUC005	BWEARPAC	0.04133	0.05965	0.69291
YES	BUC007	BWEARS02	-0.45247	0.13711	-3.30013
YES	BUC019	DIESEL01	7.80060	1.68657	4.62512
YES	BUC022	ECRUST01	0.91144	0.08303	10.97680
YES	BUC024	PCHKG03	-0.00034	0.02572	-0.01336
YES	BUC026	GASLIGHT	0.01536	0.03143	0.48867
YES	BUC030	LDAUTO1	6.82658	1.07995	6.32119
YES	BUC033	MECOCHAR	-0.23804	0.94057	-0.25308
YES	BUC034	MECOFRY	0.23434	0.21410	1.09455
YES	BUC036	MOTOR01	-0.00892	0.00382	-2.33366
YES	BUC041	GCYSTC3	-0.49733	0.23985	-2.07354
YES	BUC050	SDUST02	-4.21593	1.19168	-3.53780
YES	BUC054	TRANS02	3.83994	0.45842	8.37649
YES	BUC059	WSDUST	0.39828	0.54321	0.73320
YES	BUC061	CONST2	-0.25258	0.11147	-2.26587
YES	BUC071	RS465	-1.20911	0.77167	-1.56686
YES	BUC073	TWEAR04	-0.80734	0.26771	-3.01579
YES	BUC076	PRDHW	0.35337	0.43692	0.80879
YES	BUC084	MOTOR03	0.10818	0.09099	1.18898
YES	BUC086	GASOLINA	0.47318	0.16031	2.95173

<b>SAMPLE</b>	Site: muestra9	Date: 42087.00	Duration: 9.	Start Hour: 0.	
<b>OPTIONS</b>	Iteration Delta: 20	<input type="checkbox"/> Britt-Luecke	<input type="checkbox"/> Best Fit		
	Maximum Source Uncertainty (%): 20	<input type="checkbox"/> Source Elimination			
	Minimum Source Projection: 0.95				
	Decimal Places Displayed: 5	Species Fit Array: 1			
	Units: $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sources Fit Array: 1			
<b>FITTING STATISTICS:</b>					
	R SQUARE	0.99	% MASS	100.6	
	CHI SQUARE	0.33	DEGREES FREEDOM	17	
<b>SOURCE CONTRIBUTION ESTIMATES:</b>					
SOURCE	EST CODE	NAME	SCE( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Std Err	Tstat
YES	BUC001	BDUST01	-2.33530	1.75440	-1.33111
YES	BUC002	BWEAR01	1.62135	1.18523	1.36796
YES	BUC005	BWEARPAC	0.08343	0.13659	0.61086
YES	BUC007	BWEARS02	-0.56043	0.34240	-1.63679
YES	BUC019	DIESEL01	2.61873	3.02872	0.86463
YES	BUC022	ECRUST01	2.12304	0.20553	10.32984
YES	BUC024	PCHKG03	-0.00168	0.05677	-0.02959
YES	BUC026	GASLIGHT	0.02386	0.07028	0.33944
YES	BUC030	LDAUTO1	25.69179	2.35670	10.90158
YES	BUC033	MECOCHAR	-1.25874	2.09901	-0.59968
YES	BUC034	MECOFRY	0.23924	0.29835	0.80190
YES	BUC036	MOTOR01	-0.00722	0.00898	-0.80436
YES	BUC041	GCYSTC3	-1.29547	0.72309	-1.79157
YES	BUC050	SDUST02	-13.21749	2.94757	-4.48420
YES	BUC054	TRANS02	15.61889	1.50240	10.39599
YES	BUC059	WSDUST	1.10735	1.30789	0.84667
YES	BUC061	CONST2	-0.25655	0.23702	-1.08241
YES	BUC071	RS465	-1.23818	1.03062	-1.20139
YES	BUC073	TWEAR04	-3.79883	1.08542	-3.49986
YES	BUC076	PRDHW	1.24795	1.36534	0.91403
YES	BUC084	MOTOR03	0.12720	0.07894	1.61141
YES	BUC086	GASOLINA	0.63738	0.34748	1.83431