

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE
CARBONO NEGRO EN MUESTRAS DE MATERIAL PARTICULADO DE LA CIUDAD
DE BOGOTÁ.**

**MARÍA ANGÉLICA DELGADO BARRIOS
ROGER EDUARDO NAVARRO PINILLA**

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

2019

**COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE
CARBONO NEGRO EN MUESTRAS DE MATERIAL PARTICULADO DE LA CIUDAD
DE BOGOTÁ.**

**MARÍA ANGÉLICA DELGADO BARRIOS
ROGER EDUARDO NAVARRO PINILLA**

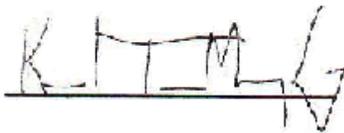
Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de:

INGENIERIA AMBIENTAL.

DIRECTOR DEL PROYECTO:

PhD. Kento Taro Magara Gómez

VISTO BUENO DIRECTOR



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA

2019

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bucaramanga, octubre 2019.

**Dedicado a nuestros familiares y profesor quienes nos brindaron todas las herramientas para lograr
nuestras metas profesionales.**

Agradecimientos

Gracias a Dios por permitirnos culminar con éxito nuestro proyecto de grado para dar comienzo a una nueva etapa como lo es la vida profesional.

Gracias a nuestros seres queridos por apoyarnos desde el comienzo en nuestra carrera universitaria y brindarnos las herramientas necesarias para lograr nuestras aspiraciones.

A nuestro director PhD. Kento Taro Magara Gómez, por dedicarnos su tiempo para corregir y mejorar este proyecto de grado, también por brindarnos su apoyo como profesor y amigo.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y a la facultad de Ingeniería Ambiental por brindarnos una excelente formación educativa.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS	20
1.1 Objetivo General.....	20
1.2 Objetivos Específicos.....	20
2.1. CARBONO NEGRO (BLACK CARBON).....	21
2.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL BLACK CARBON	24
2.2.1 Velocidad del viento.....	25
2.2.2 Dirección del viento.	25
2.2.3 Variación de la temperatura con la altura	25
2.3 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL BLACK CARBON.....	26
2.3.1 Causas y efectos del Black Carbon en el clima	26
2.3.2 Causas y efectos del Black Carbon en la salud.....	27
2.4 ELEMENTOS Y METODOS DE MEDICIÓN DEL BLACK CARBON.....	28
2.4.1 Método Óptico (Transmisómetro OT-21, Sootscan)	28
2.4.2 Método Térmico/Óptico	29
2.4.3 Método Fotográfico.....	29
2.4.4 Equipos de muestreo: filtros	30
3. METODOLOGÍA.....	31

3.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE BLACK CARBON EN PM POR EL METODO ÓPTICO DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTA, COLOMBIA.	31
3.2 DETERMINACIÓN DE BLACK CARBON POR EL MÉTODO FOTOGRÁFICO DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA.....	33
3.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO FOTOGRÁFICO Y MÉTODO ÓPTICO DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS EN BOGOTÁ, COLOMBIA.	37
4. DATOS Y ANALISIS.....	38
4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR LA SALLE PM10.	38
4.1.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector la Salle PM10.....	41
4.1.2 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en PM10 sector la Salle.	43
4.1.3 Comparación de las concentraciones de EC y OC en el sector la Salle PM10.	45
4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR LA SALLE PM2.5.	45
4.2.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector la Salle PM2.5.....	47
4.2.2 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptica (BC) y térmico/óptico (EC) en PM2.5 sector la Salle.	49
4.2.3 Comparación de las concentraciones de EC y OC en el sector la Salle PM2.5.	50

4.3 COMPARATIVO Y COMPOSICIÓN DE ELEMENTAL CARBON EN EL SECTOR LA SALLE PM10 Y PM2.5.....	50
4.3.1 Relación entre las mediciones en PM10 y PM2.5 de OC/EC en el sector la Salle.....	53
4.3.2 Análisis de la composición de las mediciones en PM10 y PM2.5 en el sector la Salle.	54
4.4 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR BOMBEROS PM10.	56
4.4.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector Bomberos PM10.	58
4.4.2 Contenido del BC en el sector Bomberos PM10.	60
4.4.3 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en el sector Bomberos PM10.	61
4.5 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR MOVILIDAD PM10.	64
4.5.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector Movilidad PM10.	67
4.5.2 Contenido del BC en el sector Movilidad PM10.	69
4.5.3 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en el sector Movilidad PM10.	70
4.5.4 Análisis de la composición de las mediciones en PM10 en el sector Movilidad.	71

4.6 ANÁLISIS DE LOS TRES SECTORES (LA SALLE, BOMBEROS Y MOVILIDAD) PARA LAS MEDICIONES EN PM10 DE OC/EC.	72
4.7 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL BLACK CARBON.	74
5. CONCLUSIONES.....	75
6. RECOMENDACIONES.....	77
7. BIBLIOGRAFIA.....	78
ANEXOS	82

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector la Salle PM10.	40
Grafica 2. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Salle PM10.	42
Grafica 3. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector la Salle PM10.....	43
Grafica 4. Comparación de la concentración de EC y OC sector la Salle PM10.	45
Grafica 5. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector la Salle PM2.5	46
Grafica 6. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Salle PM2.5	48
Grafica 7. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector la Salle PM2.5.....	49
Grafica 8. Comparación de la concentración de EC y OC sector la Salle PM2.5.	50
Grafica 9. Comparativo de EC en PM10 y PM2.5 sector la Salle.	51
Grafica 10. Composición de EC en PM10 y PM2.5 sector la Salle.	52
Grafica 11. Valores de OC/EC en PM2.5 y PM10 sector la Salle.	53
Grafica 12. Composición de las mediciones de PM 2.5 y PM 10 en el sector la Salle.	55
Grafica 13. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector Bomberos PM10.	57
Grafica 14. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Bomberos PM10.....	59

Grafica 15. Contenido de las concentraciones de BC en PM10 sector Bomberos.	60
Grafica 16. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector Bomberos PM10.	61
Grafica 17. Comparación de la concentración de EC y OC sector Bomberos PM10.	62
Grafica 18. Composición de las mediciones de PM10 en el sector Bomberos.....	64
Grafica 19. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector Movilidad PM10.	65
Grafica 20. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Movilidad PM10.	68
Grafica 21. Contenido de las concentraciones de BC en PM10 sector Movilidad.	69
Grafica 22. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector Movilidad PM10.	70
Grafica 23. Comparación de la concentración de EC y OC sector Movilidad PM10.	71
Grafica 24. Composición de las mediciones de PM10 en el sector Movilidad.	72
Grafica 25. Relación de OC/EC entre los sectores la Salle, Bomberos y Movilidad (PM10).....	73

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Variables constantes del método óptico transmisómetro Sootscan OT21 y de las muestras de los filtros.....	38
Tabla 2. Recopilación de datos y valores del BC por el método óptico en el sector la Salle PM10.	38
Tabla 3. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector la Salle PM 10.....	39
Tabla 4. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector la Salle PM10.	40
Tabla 5. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector la Salle PM10.....	41
Tabla 6. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector la Salle PM 2.5.....	45
Tabla 7. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector la Salle PM 2.5.....	46
Tabla 8. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector la Salle PM2.5.....	47
Tabla 9. Valores de Elemental Carbon (EC) en PM10 y PM2.5 sector la Salle.	50
Tabla 10. Valores de PM2.5 y PM10 (OC/EC) sector la Salle.	53
Tabla 11. Resultados de EC, OC y PM en el sector la Salle.....	54
Tabla 12. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector Bomberos PM10.....	56

Tabla 13. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector Bomberos PM10.....	57
Tabla 14. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector Bomberos PM10.....	58
Tabla 15. Resultados de EC, OC y PM en el sector Bomberos PM10.	63
Tabla 16. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC), valor fotos (ATN) y BC óptico en el sector Movilidad PM10.	64
Tabla 17. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado en el sector Movilidad PM10.....	66
Tabla 18. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector Movilidad PM10.	67
Tabla 19. Resultados de EC, OC y PM en el sector Movilidad.	71
Tabla 20. Resultados de OC/EC en los sectores la Salle, Bomberos y Movilidad (PM10).....	72

LISTA DE IMÁGENES

Imagen No 1. Black Carbon cubierto de otras partículas del ambiente.....	22
Imagen No 2. Black Carbon parcialmente cubierto.	22
Imagen No 3. Black Carbon puro.....	23
Imagen No 4. 50% cubierto de partículas del ambiente, 34% parcialmente cubierto, 12% de inclusión de partículas y 4% puro.	23
Imagen No 5. Transmisómetro Sootscan OT21.	31
Imagen No 6. Blanco	32
Imagen No 7. Muestra de blanco método fotográficos.....	34
Imagen No 8. Software Paint Herramientas.....	34
Imagen No 9. Software Paint Herramientas.....	35
Imagen No 10. Software Paint Herramientas.....	35
Imagen No 11. Software Paint Herramientas.....	36

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Determinación de concentración del BC.	32
Ecuación 2. Determinación de concentración de UV.....	33

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Tablas de recopilación de datos de BC la Salle PM2.5, Bomberos PM10 y Movilidad PM10.	82
ANEXO B. Tablas del resultado de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico en los sectores la Salle PM10 y PM2.5, Bomberos y Movilidad PM10.	84
ANEXO C. Fotos del método fotográfico.....	86
ANEXO D. Reporte de datos del método fotográfico.	93
ANEXO E. Datos de transmisómetro Sootscan OT21.	116
ANEXO F. Acta de inicio del proyecto de investigación.	118

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO NEGRO EN MUESTRAS DE MATERIAL PARTICULADO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ.

AUTOR(ES): Maria Angelica Delgado Barrios
Roger Eduardo Navarro Pinilla

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Kento Taro Magara Gómez

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó la comparación de tres métodos de cuantificación del contenido del Black Carbon (BC) en muestras de material particulado de la ciudad de Bogotá. Los tres métodos de medición del contenido de Black Carbon fueron: Método Óptico, el cual calcula el contenido del BC a través de la atenuación de la luz transmitida a través de un filtro, el método Térmico-óptico, que es un método más avanzado ya que permite calcular el radio carbono orgánico/carbono elemental, y por último, se empleó una reciente, rápida y sencilla técnica de medición del BC que se conoce con el nombre de método fotográfico; se desarrolló la idea de aplicar las técnicas de visión artificial a fotografías hechas a los filtros, basándose en el principio de que la reflectancia (porcentaje de luz reflejada por una superficie opaca) de un filtro contaminado expuesto a un determinado espectro de luz esta se relacione directamente con la carga del BC. El estudio y comparación de los tres métodos de cuantificación del contenido del BC, en general presentaron diferencias y los resultados variaron en los distintos sectores de muestreo. A pesar de que los resultados obtenidos fueron diferentes en las técnicas de medición, se encontró cierta correlación en algunos casos, lo cual brinda la oportunidad de realizar más estudios con el fin de optimizar los métodos y su aplicación en el campo de la contaminación atmosférica.

PALABRAS CLAVE:

Black Carbon, Material Particulado, Método óptico, Método fotográfico, Método Térmico/óptico.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF QUANTIFICATION METHODS OF BLACK CARBON CONTENT IN SAMPLES OF PARTICULATE MATTER OF THE CITY OF BOGOTÁ.

AUTHOR(S): Maria Angelica Delgado Barrios
Roger Eduardo Navarro Pinilla

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Magara Gómez

ABSTRACT

In this project, three methods of quantification of the Black Carbon (BC) content in samples of particulate matter from Bogotá's city were compared. The three methods used to measure the BC content were: the Optical Method, which calculates the content of the BC through the attenuation of light transmitted through a filter; the Thermal-Optical Method, which is a more advanced method since it allows the calculation of the radio organic carbon/elemental carbon; and the Photographic Method, which is a recent, faster and simpler measurement technique because it is based on the principle that the reflectance (percentage of light reflected by an opaque surface) of a contaminated filter exposed to a certain spectrum of light is directly related to the BC load. The comparison of the three methods of quantification of the BC content presented differences and the results varied according to the different sectors of sampling. Although the results obtained were different in the measurement techniques, a certain correlation was found in some cases, which gives the opportunity to perform more studies in order to optimize the methods and their application in the field of air pollution.

KEYWORDS:

Black Carbon, Particulate Matter, Optical Method, Photographic Method, Thermal-Optical Method.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Para analizar el contenido de Black Carbon (BC) es necesario emplear métodos, que cuenten con estrategias concretas e integrales. Existen dos métodos ya estipulados y con gran variedad de estudios científicos que validan sus resultados, se les conoce como: Método óptico (transmisómetro, Sootscan OT21) y Método térmico/óptico siguiendo los protocolos NIOSH (Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional) (Elemental Carbon (Diesel Particulate) method 5040, in NIOSH Manual of Analytical Methods) y IMPROVE (Monitoreo Interagencial de Entornos Visuales Protegidos) (Chow, y otros). Estos métodos analizan el material particulado recolectado en filtros, ya que existen equipos que pueden determinar concentraciones del BC en tiempo real y se les conoce como Etalómetros. Como se menciona anteriormente, existen resultados y estudios los cuales emplean ambos métodos para lograr resultados satisfactorios en los análisis de muestras de contaminación atmosférica y específicamente midiendo concentraciones del BC.

El BC es un componente generado a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles; los compuestos carbonados se incineran en ausencia de oxígeno en zonas de mezcla de aire combustibles muy pobres, o, en otros términos, se pirolizan. El BC es un componente del material particulado fino (PM_{2.5}) que permanece durante un periodo de tiempo relativamente corto en la atmosfera, a diferencia de gases como el CO₂ (A & Silva, 2017).

Recientemente fue desarrollado un nuevo método para determinar el contenido del BC en el material particulado, este método es más económico y sencillo de utilizar. Además, no requiere de aparatos especializados. Se le conoce con el nombre de Método óptico-fotográfico. Consiste en obtener la concentración del BC a partir de un análisis sencillo de imagen utilizando funciones de visión artificial que permiten calcular la densidad del rojo. Son muy pocos los estudios y artículos de esta técnica, por lo tanto, se implementará en siguiente proyecto de tesis de grado.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

Comparar los métodos de cuantificación del contenido de carbono negro en muestras de material particulado de la ciudad de Bogotá.

1.2 Objetivos Específicos

Determinar el contenido de carbono negro en muestras de material particulado, recolectadas en diferentes puntos de la ciudad de Bogotá (zona rural, zona industrial y zona de menor actividad antropogénica), por medio de diferentes técnicas de medición.

Evaluar la distribución espacial y temporal de la concentración de carbono negro en el material particulado recolectado en los puntos de muestreo.

Comparar por medio de un análisis estadístico simple los resultados de la aplicación de dos métodos diferentes de determinación de carbono negro en material particulado: método óptico (transmisómetro, Sootscan OT21) y el método óptico fotográfico.

2. MARCO TEORICO.

2.1. CARBONO NEGRO (BLACK CARBON).

Cuando algunas sustancias, compuestos o formas de energía (solar, solar térmica, fósil, biomasa, entre otras) se encuentran en el aire en concentraciones o niveles tales que pueden causar daños o molestias a personas, animales, vegetación o materiales se denominan contaminantes atmosféricos (Ministerio de ambiente, 2013).

El BC es uno de los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), junto con el ozono troposférico, el metano y los hidrofluorocarbonados (HFC). Se trata de un componente del material particulado fino (PM_{2.5}) y uno de los principales contribuyentes al cambio climático (Andreae & Gelencsér, 2006). Hace parte de los contaminantes atmosféricos con los cuales convivimos en nuestra vida cotidiana y conllevan numerosos efectos negativos para el entorno y el ser humano (Solaun, Sopelana , Arraibi, & Pérez, Black Carbon y sus efectos en el clima, 2014).

Las emisiones del BC están íntimamente relacionadas con la forma de producción que utiliza una región o país. En la actualidad son las regiones en desarrollo las que más BC emiten, especialmente Asia, Latinoamérica y África (Solaun, Sopelana , Arraibi, & Pérez, Black Carbon y sus efectos en el clima, 2014).

Las mayores emisiones de este contaminante se generan a partir de la pirólisis y los motores diésel para el transporte y para uso industrial (Solaun, Sopelana , Arraibi, & Pérez, Black Carbon y sus efectos en el clima, 2014).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), el material particulado (PM, en adelante), BC, consiste en una compleja mezcla de partículas líquidas y sólidas de sustancias

orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Las partículas se clasifican, en función de su diámetro aerodinámico, en PM10 (partículas con un diámetro aerodinámico inferior a 10 μm) y PM2.5 (diámetro aerodinámico inferior a 2.5 μm), como el caso del BC (OMS, 2011).

Las siguientes imágenes, son diferentes formas en las que se encuentra el BC en el ambiente, de acuerdo con condiciones meteorológicas, tiempo de vida media en la atmosfera y presencia de especies orgánicas semi-volátiles.

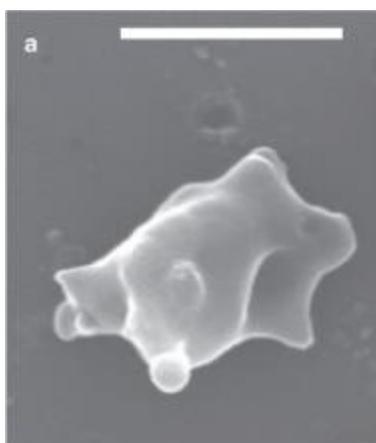


Imagen No 1. Black Carbon cubierto de otras partículas del ambiente.

Fuente: <http://www.nature.com>

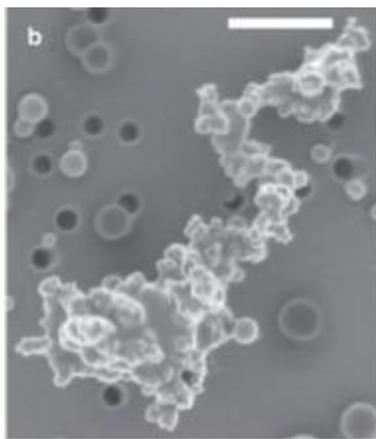


Imagen No 2. Black Carbon parcialmente cubierto.

Fuente: <http://www.nature.com>

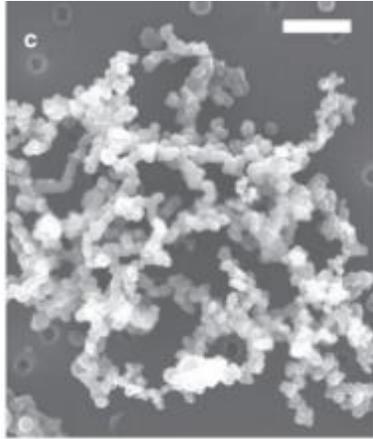


Imagen No 3. Black Carbon puro.
Fuente: <http://www.nature.com>

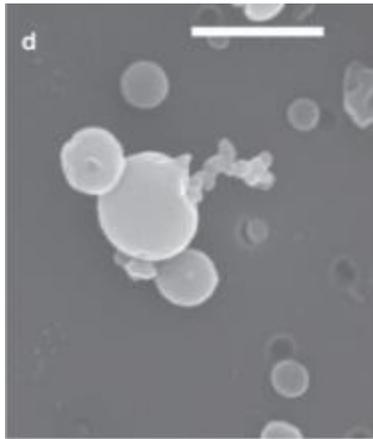


Imagen No 4. 50% cubierto de partículas del ambiente, 34% parcialmente cubierto, 12% de inclusión de partículas y 4% puro.
Fuente: <http://www.nature.com>

➤ Coeficiente de absorción del Black Carbon.

El coeficiente de absorción del BC se define por el grado de absorción de energía, la cual, para este caso, es de radiación electromagnética por ejemplo luz ultravioleta o infrarroja y es relacionado con el forzamiento radiactivo. El valor de absorción del BC oscila entre rangos de 2 m²/g a 25 m²/g a 550 nanómetros de longitud de onda (Kassianov I., C. Barnard , & P. Ackerman, 2005).

Las características o propiedades ópticas que influyen en el coeficiente de absorción son, el índice de refracción, densidad, distribución de tamaño, estado de mezcla y la forma de las partículas, y cuando se habla de propiedades intensivas se refiere al MAC (mass absorption cross section/ sección transversal de absorción de masa) y se busca la estimación de los valores en todas las longitudes de ondas (BOND, y otros, 2013).

Así mismo el MAC cuando solo se atribuye para mediciones del BC, toma el nombre de MACBC dándole énfasis en la utilización para la medición del BC y se calcula dividiendo la absorción coeficiente atribuible a BC por la concentración de masa BC (BOND, y otros, 2013).

2.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL BLACK CARBON

Los factores de influencia más relevantes implicados en la calidad del aire de las ciudades son: las características geográficas y topográficas de la zona, el régimen de vientos, la difusión atmosférica y los focos de emisión de contaminación (Ministerio de ambiente, 2013).

El agrupamiento de edificaciones en las ciudades tiene dos efectos claros sobre la atmosfera de su entorno. El primero es la modificación de la composición del aire y el segundo la formación de contaminantes por causa del tráfico, polígonos industriales y las calefacciones domésticas en invierno (Ministerio de ambiente, 2013).

Si la atmosfera se mantiene estable facilita el aumento de la concentración de contaminantes y la formación de contaminantes secundarios (Ministerio de ambiente, 2013).

La capacidad de la atmosfera de diluir las concentraciones de contaminantes viene determinada por las condiciones meteorológicas. Una atmosfera estable, sin movimiento, propiciará la acumulación de contaminantes facilitando así la formación de contaminantes secundarios. Sin

embargo, una atmosfera inestable y dinámica difundirá rápidamente los contaminantes debido a la turbulencia atmosférica (Ministerio de ambiente, 2013).

2.2.1 Velocidad del viento.

La velocidad del viento está asociada con la turbulencia de origen mecánico. En las zonas urbanas siempre se detectan bajos niveles de contaminación atmosférica con situaciones de viento apreciable, debido al efecto de barrido que ejerce sobre las masas de aire (Ministerio de ambiente, 2013).

2.2.2 Dirección del viento.

La dirección del viento determina el área hacia el cual se puede desplazar la contaminación emitida en un punto. Cuando se estudian focos puntuales de emisión, como grandes chimeneas, debemos considerar las direcciones principales de viento, dado que estas determinarán la trayectoria de la columna de humo (Ministerio de ambiente, 2013).

2.2.3 Variación de la temperatura con la altura.

La variación de la temperatura con la altura es un elemento clave a la hora de entender los fenómenos de dispersión atmosférica, así como la elevación o ascenso de la columna de las chimeneas (Ministerio de ambiente, 2013).

Cuando un volumen de aire se encuentra a una temperatura superior a la del aire que lo rodea, tiende a ascender dada su menor densidad. A su vez, este volumen de aire va sufriendo la consiguiente expansión debido a que en su ascenso va encontrando capas de aire de menor presión (Ministerio de ambiente, 2013).

La energía requerida para expandirse, al no existir un intercambio apreciable de energía con el exterior (proceso adiabático), debe tomarse de la energía interna del volumen de aire. Dado que la

energía interna está directamente asociada a la temperatura, esta expansión provoca una disminución de la temperatura del aire ascendente (Ministerio de ambiente, 2013).

La localización geográfica y la altitud determinan de manera importante el impacto del BC en el clima. Las partículas finas emitidas en la combustión, incluyendo el BC pueden ser transportadas miles de kilómetros lejos de las fuentes de emisión. Las partículas tienen un efecto eficiente en la absorción total de radiación solar por la atmosfera cuando son emitidas en colores claros o transportadas a superficies claras, superficies reflectivas (alto índice “albedo”) como hielo, nieve y desiertos. En la ausencia de PM, un alto porcentaje de luz solar no podría ser reflejada por estas superficies de regreso al espacio. Por ellos, cualquier absorción tanto de la luz entrante como reflejada por el PM sobre estas superficies calienta más que el oscurecimiento de las superficies. Aun si el PM es generalmente clasificado como reflejante pero también puede oscurecer las superficies claras y contribuir al calentamiento (Quinn, Stohl, Arneth, & Berntsen, 2011). Además, el efecto radiativo neto del BC puede ser sensitivo a la altura. Así como las partículas suspendidas sobre los desiertos o glaciares claros, las partículas suspendidas en los cúmulos de nube pueden absorber tanta radiación solar entrante o saliente de la Tierra, incrementando el efecto radiativo neto de la absorción de luz por las partículas (USEPA, 2012).

2.3 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DEL BLACK CARBON.

2.3.1 Causas y efectos del Black Carbon en el clima

El BC se encuentra suspendido en el aire y posteriormente se sedimenta en la superficie terrestre, el BC tiene una característica de absorción de radiación solar, el cual se transforma y se emite en forma de calor, esto en superficies de nieve o hielo puede acelerar el proceso de fusión generando el derretimiento de los glaciares en los polos, siendo un influenciador en el calentamiento global

altamente activo (Solaun, Sopelana, Arraibi, & Pérez, Black Carbon y sus efectos en el clima , 2014).

Otro efecto del BC reside en los cambios que se genera en las nubes, esto debido a que acumulan gran cantidad del BC en ellas y hace que altere sus ciclos de lluvia, generando efectos de sequía o lluvias en tiempos contrarios, así mismo llega a producir nubes marrones que generan impactos como en los patrones de lluvia, gradientes de temperatura (Solaun, Sopelana, Arraibi, & Pérez, Black Carbon y sus efectos en el clima , 2014).

Por otro lado, las propiedades de absorción y dispersión son dos parámetros cruciales en la determinación del impacto de los aerosoles en el balance radiativo de la tierra. El EC (elemental carbon) juega un papel importante en el forzamiento radiativo como una especie potencial absorbente de luz y por lo tanto se considera la más grande fuerza radiativa después del dióxido de carbono para inducir el calentamiento global. (Ramirez , Sanchez de la Campa, & de la Rosa, 2018)

2.3.2 Causas y efectos del Black Carbon en la salud.

El BC no solo afecta el ecosistema y el clima, también afecta la salud humana, a lo largo de la investigación se ha demostrado que el material particulado tiene efectos sobre la salud muy marcados, la mayoría van de la mano con el sistema respiratorio ya que es por donde se ingiere este tipo de partículas. Entre los efectos del BC asociados a la salud podemos encontrar efectos: Fibrogénicos, irritantes, carcinogénicos, tóxicos y respiratorios (AINSO, págs. 40-41).

Observando los estudios de los efectos en la salud de las PM_{2.5}, la EPA ha reconocido que es plausible que la composición química de las PM podría ser un mejor predictor de los efectos en la salud que el tamaño de partícula por sí solo (USEPA, 2009).

Las diferencias en los constituyentes ambientales de las PM_{2.5} han sido observadas en diferentes regiones geográficas tan bien como las diferentes concentraciones regionales de PM_{2.5} que se relacionan con los efectos en la salud (USEPA, 2009).

Algunos estudios epidemiológicos en comunidades han incluido el BC como uno de los muchos indicadores de las partículas finas en la contaminación del aire. De los componentes de las PM_{2.5} (Bell, Kim, & Dominici, 2007). Los efectos observados del BC en estudios de salud son similares a los observados para las PM_{2.5} y algunos otros constituyentes del PM (Ej., níquel, vanadio, etc.), sugieren que estos efectos no son solo atribuidos al BC. Podría ser difícil separar la contribución del BC a estas asociaciones de la contribución de su co-emitido carbono orgánico (OC) y otros contaminantes primarios co-emitidos que están correlacionados en los mismos tipos de estudio. Sin embargo, estos estudios aun proveen evidencia consistente sobre la asociación entre la morbilidad cardiovascular y las concentraciones del BC (USEPA, 2009).

2.4 ELEMENTOS Y METODOS DE MEDICIÓN DEL BLACK CARBON.

2.4.1 Método Óptico (Transmisómetro OT-21, Sootscan)

Para el método óptico se utiliza un equipo que mide el creciente de absorción de luz de las muestras del BC, en primero agregar el blanco para ser medido y posteriormente las muestras, las cuales se les inyectará luz infrarroja y ultravioleta, por su absorción se obtendrá datos de IR y UV que se implementarán en la fórmula para conocer la concentración del BC y densidad de UV (MAGEE SCIENTIFIC , s.f.), (ver formula 1 & 2).

No obstante, según el artículo de Andreae se tiene también un sesgo en cuanto a la medición del BC debido a la presencia de C_{brown} (carbono marrón), ya que el BC adsorbe radiación solo con la parte roja es decir la luz IR y el C_{brown} adsorbe la luz UV, de esta manera se deja a un lado las

mediciones de C_{brown} , el cual también tiene un papel fundamental en el cambio climático. (Andreae & Gelencsér, 2006).

2.4.2 Método Térmico/Óptico

El método térmico/óptico utiliza un equipo que consiste en una primera etapa térmica, la cual es la combustión del material orgánico presente en el filtro y una segunda etapa óptica, en la cual se extraen los gases de combustión, se inyecta un gas inerte y se piroliza lo que queda del filtro, y a lo producido si se le mide la adsorción de radiación IR, la cuantificación se realiza mediante un software que imprime un termograma con las etapas del análisis y los resultados de OC, EC. El cálculo de la concentración de cada filtro se hace en base a la cantidad de material particulado, tiempo y volumen de muestreo (Diaz Hernandez , 2016).

2.4.3 Método Fotográfico

Este método consiste en la utilización de programas básicos tales como Paint, Excel y equipos sencillos como cámara fotográfica, ya sea la de un celular de alta gama o una cámara profesional. La implementación del método consiste en la extracción de la banda roja en las imágenes y el uso de fórmulas matemáticas para posteriormente lograr una comparación entre los otros dos métodos (térmico óptico y óptico).

2.4.4 Equipos de muestreo: filtros

Existen en la actualidad distintos tipos de filtros que se pueden usar a la hora de tomar muestras de material particulado, entre ellos encontramos, filtros de fibra de vidrio, fibra de cuarzo y filtros de resina.

- **Filtros de Fibra de Vidrio:** No poseen ligantes y tienen un bajo contenido de metales traza. No se ven afectadas por la humedad, alta resistencia a la agresión de químicos y son biológicamente inertes. Se utilizan para tomar muestras de aerosoles, partículas y contaminantes metálicos (Filtros de profundidad de PTFE, s.f.).
- **Filtros de Resina:** Especializados en la medición de polvo y partículas del aire. Estos filtros con recubrimiento de PTFE (politetrafluoroetileno) son hidrófobos y no se ven afectados por la humedad. Termoestable a 500 °F (260 °C) (Filtros de profundidad de PTFE, s.f.).
- **Filtros de Fibra de Cuarzo:** Su uso más particular de estos filtros es de tomar muestras de gases ácidos a altas temperaturas. Las fibras de cuarzo no se ven afectadas por la humedad, tienen una alta resistencia a la agresión de químicos y son biológicamente inertes. Baja cantidad de materia orgánica debido a que son expuestos al fuego previamente. Pueden mostrar un bajo contenido de trazas de metales y no absorben los dióxidos de nitrógeno y sulfuro (Filtros de profundidad de PTFE, s.f.).

En el caso del proyecto los filtros óptimos son los filtros de cuarzo, debido a sus características de absorción, su baja cantidad de material orgánico y su baja afectación de la humedad, son los más eficientes para este tipo de muestreo, que tiene como fin la recolección del BC.

3. METODOLOGÍA

El siguiente proyecto de grado se realizó en convenio con la empresa ECOPEPETROL y la Universidad de la Salle, donde un equipo especializado de trabajo recolectó muestras del PM en la ciudad de Bogotá. Los análisis cuantitativos del BC se realizaron en la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Bucaramanga en el laboratorio de contaminación atmosférica.

A continuación, se especificarán los métodos que se utilizaron.

3.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE BLACK CARBON EN PM POR EL METODO ÓPTICO DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTA, COLOMBIA.

Para el proceso de determinación del BC por el método óptico se usó un equipo conocido como el transmisómetro, Sootscan OT21.

Por consiguiente, se explicarán los pasos a seguir para la determinación del BC con el método óptico (transmisómetro, Sootscan OT21):

- 1) Medición del blanco en el transmisómetro con el mismo tipo de filtro (cuarzo) usado para la toma de muestras.



Imagen No 5. Transmisómetro Sootscan OT21.

Fuente: shorturl.at/dADV6

- 2) Una vez calibrado con el blanco el cual permanece en todo momento dentro del transmisómetro se agregó las muestras con el material particulado.



Imagen No 6. Blanco
Fuente: Autores.

- 3) Posteriormente se le inyecta luz IR y UV al material particulado y el transmisómetro Sootscan OT21 arroja los valores de atenuación de luz.
- 4) El proceso se repite tres veces cambiando la posición del filtro para realizar un promedio, con el fin de comprobar cambios en los valores de absorción de luz.

Una vez tomado los datos promediados del transmisómetro de la absorción de luz, se pasa al proceso de cálculo para la determinación de concentración del BC en las muestras.

$$BC \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{\left(\frac{IR \left(\frac{cm^2}{\mu g} \right)}{\text{Sigma IR}} \right) * \text{Area del filtro } (cm^2)}{\text{Volumen estandar } (m^3)}$$

Ecuación 1. Determinación de concentración del BC.

$$UV \left(\frac{\mu g}{m^3} \right) = \frac{\left(\frac{UV \left(\frac{cm^2}{\mu g} \right)}{\text{Sigma UV}} \right) * \text{Area del filtro } (cm^2)}{\text{Volumen estandar } (m^3)}$$

Ecuación 2. Determinación de concentración de UV.

En el caso de concentración del BC se usó las variables de luz IR $\frac{cm^2}{\mu g}$ (infrarroja), el sigma de atenuación de IR, el área del filtro y su volumen estándar para arrojar los valores del BC en $\frac{\mu g}{m^3}$, y para el cálculo de UV en $\frac{\mu g}{m^3}$, se utilizó las variables UV $\frac{cm^2}{\mu g}$ (luz ultravioleta) y el sigma de atenuación de UV.

Una vez se realizó el cálculo para cada uno de los filtros se recopilaron en una tabla de Excel para la comparación con el método fotográfico.

3.2 DETERMINACIÓN DE BLACK CARBON POR EL MÉTODO FOTOGRÁFICO DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ, COLOMBIA.

Para el método fotográfico el equipo implementado fue la cámara de un celular Huawei P20 Lite, el software de gráficos Paint y el uso del software de cálculo Excel.

Para el proceso se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se tomaron fotos con el celular Huawei P20 Lite a las muestras de material particulado, sobre un papel que contenía la escala de grises y un fondo negro.

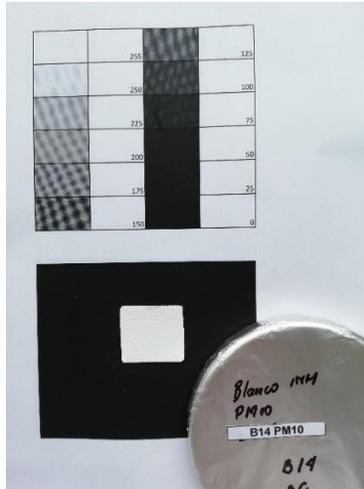


Imagen No 7. Muestra de blanco método fotográficos.
Fuente: Autores.

- 2) Una vez tomada la foto se utilizó el software grafico de Paint para extraer la banda del rojo y luego usar la herramienta de extracción de color.

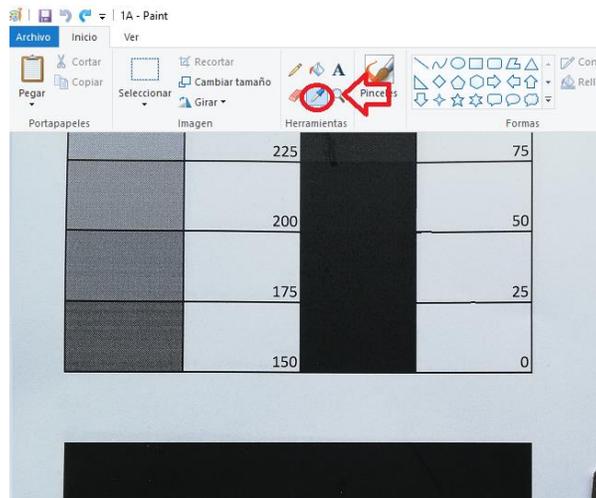


Imagen No 8. Software Paint Herramientas.
Fuente: Autores.

3) Se absorbió el color del píxel y se evidencio en la sección de color 1.

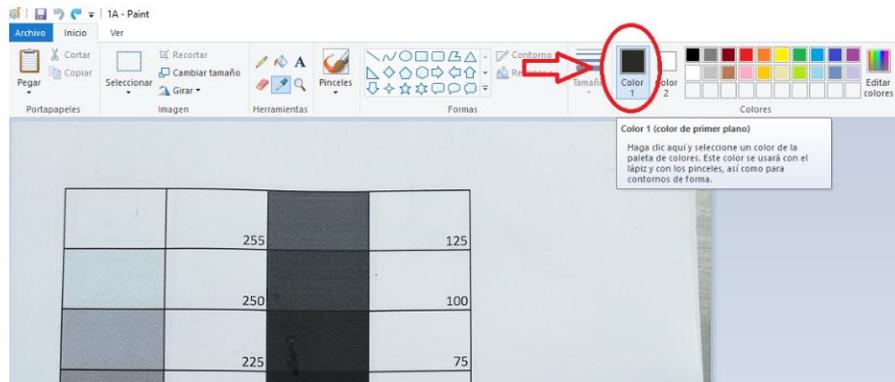


Imagen No 9. Software Paint Herramientas.

Fuente: Autores.

4) Se ingresó a la herramienta editar colores.

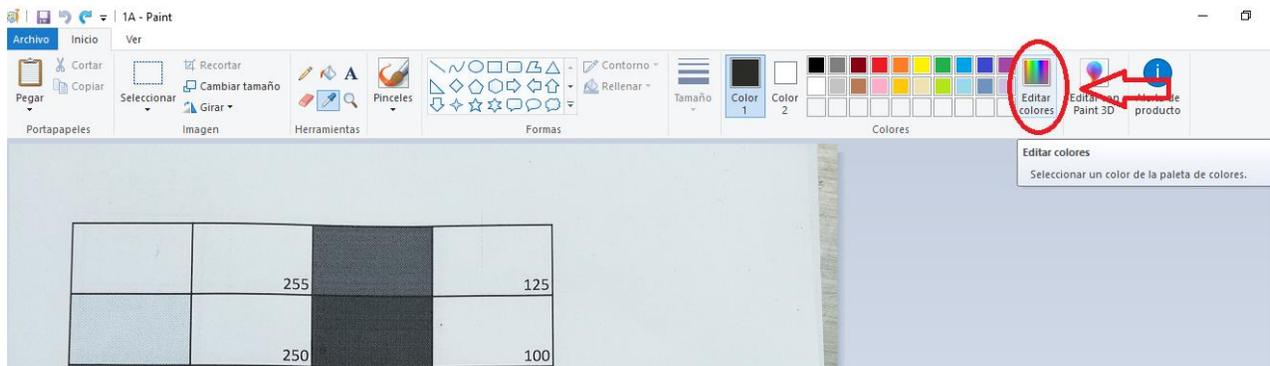


Imagen No 10. Software Paint Herramientas.

Fuente: Autores.

5) Se encontró la banda azul, verde y rojo, tomando el valor del rojo el cual es el necesario para el experimento.

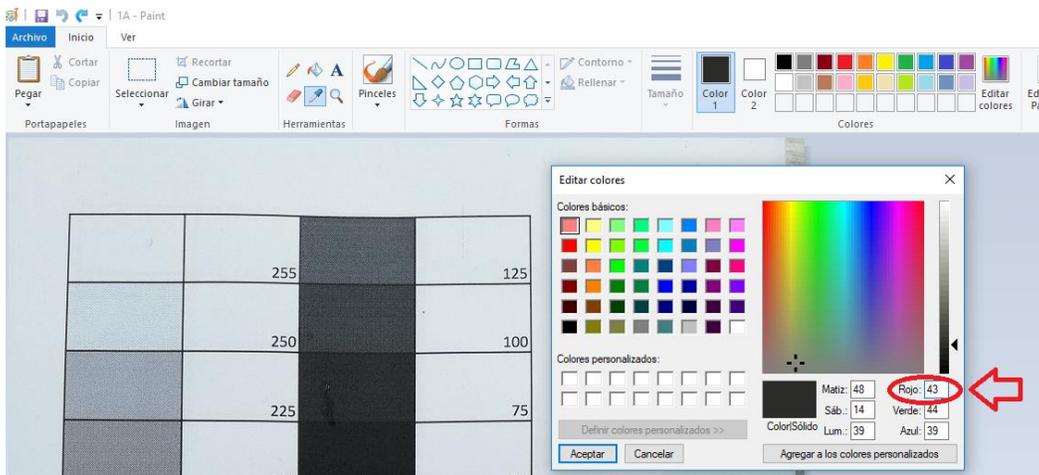


Imagen No 11. Software Paint Herramientas.

Fuente: Autores.

- 6) El proceso de extracción del rojo en los filtros se hizo tres veces en cada foto (Anexo C) con el fin de promediar y disminuir la posibilidad de un error por la diferencia de valores.
- 7) Se realizó el mismo proceso de extracción del rojo en cada una de las fotos, pero en este caso para la escala de grises, se tomaron tres valores en cada nivel (0 a 255) de la escala y se promedió.
- 8) A continuación, se usaron los valores teóricos de la escala de grises y los valores promediados en cada una de las fotos y se realizó la regresión lineal, para hallar la ecuación de la recta.
- 9) Finalmente, con el valor del rojo promediado de los filtros se reemplazó en la ecuación de la recta y se obtuvieron los valores fotográfico-reales.
- 10) Con los valores fotográficos-reales y los valores de BC obtenidos previamente del método óptico, se generó otra regresión lineal, para finalmente encontrar la última ecuación de la recta.
- 11) La ecuación de la recta obtenida del paso anterior se utilizó para convertir las mediciones fotográficas-reales o sin Unidades a concentración de BC en unidades ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.3 COMPARACIÓN ENTRE MÉTODO FOTOGRÁFICO Y MÉTODO ÓPTICO DE LAS MUESTRAS RECOLECTADAS EN BOGOTÁ, COLOMBIA.

Se realizó la comparación entre los resultados obtenidos de ambos métodos por medio de un análisis estadístico simple (regresión lineal), sobre la concentración del BC en las muestras de forma separada y posteriormente juntos. Para esto se adjuntó los valores de la metodología 3.1, en las gráficas de la metodología 3.2 y se aplicó el respectivo análisis. Finalmente se concluye sobre el uso de estos dos métodos de medición o determinación de concentración del BC. Fotos

4. DATOS Y ANÁLISIS.

A continuación, se realizaron los comparativos finales de las técnicas de medición del BC.

En la siguiente tabla 1. Se muestran los valores constantes que se usaron para el cálculo de las ecuaciones del BC. Los valores sigma IR y UV son de acuerdo con los tipos de filtros usados en el proyecto (filtros de cuarzo).

Tabla 1. Variables constantes del método óptico transmisómetro Sootscan OT21 y de las muestras de los filtros.

Sigma IR	16,6
Sigma UV	39,5
Área del filtro (cm ²)	407,6

Fuente: Autores.

4.1 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR LA SALLE PM10.

En la tabla 2, se observa los datos recopilados de los filtros, concentración PM y por otro lado también se observa el IR (luz infrarroja) el cuales se obtuvo del transmisómetro Sootscan OT21 para así poder calcular el BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) por medio de la ecuación 1.

Tabla 2. Recopilación de datos y valores del BC por el método óptico en el sector la Salle PM10.

Fecha	Código	Concentración PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IR	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27/02/2018	PM10CS001	452.535	281.6	5,3656
1/03/2018	PM10CS002	423.481	179	3,3996
3/03/2018	PM10CS003	309.611	113	2,1246
7/03/2018	PM10CS004	127.227	72	1,3813
9/03/2018	PM10CS005	143.172	101	1,8903
11/03/2018	PM10CS006	205.044	76	1,4745
19/03/2018	PM10CS009	233.021	70	1,3988

23/03/2018	PM10CS011	504.859	223	4,2355
29/03/2018	PM10CS014	89.504	37.6	0,6983
4/04/2018	PM10CS016	214.965	195	3,5863
24/04/2018	PM10CS025	162.707	109	2,0936
26/04/2018	PM10CS026	115.774	102	1,9097
2/05/2018	PM10CS028	94.118	74	1,4056
20/05/2018	PM10CS036	83.672	46.6	0,8837

Fuente: Autores.

La tabla 3. Muestra los valores de Elemental Carbon (EC) los cuales fueron obtenidos del método térmico/óptico realizado en un laboratorio Estatal de Higiene de Wisconsin en Estados Unidos.

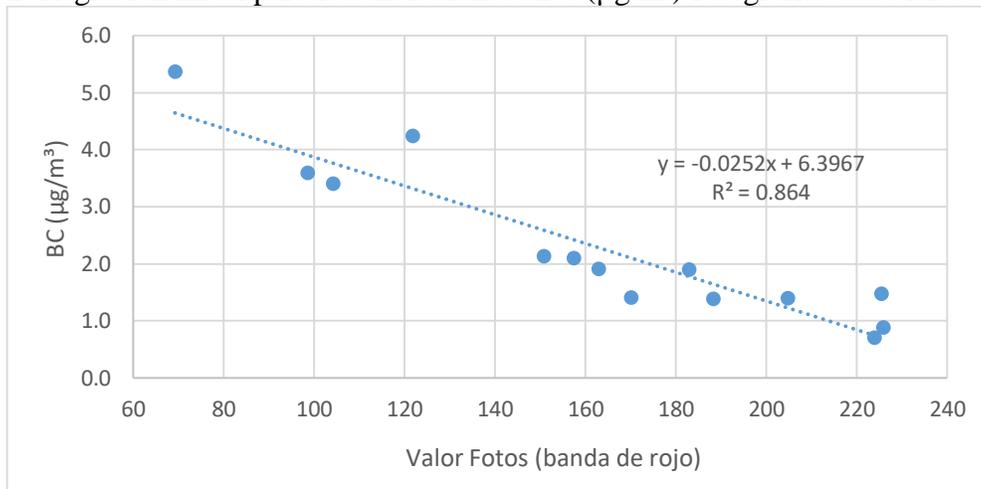
Tabla 3. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector la Salle PM 10.

Código	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10CS001	6.2405	5.3656
PM10CS002	2.6703	3.3996
PM10CS003	1.3140	2.1246
PM10CS004	1.3026	1.3813
PM10CS005	1.1744	1.8903
PM10CS006	1.3366	1.4745
PM10CS009	N/A	1.3988
PM10CS011	2.9101	4.2355
PM10CS014	0.3175	0.6983
PM10CS016	N/A	3.5863
PM10CS025	N/A	2.0936
PM10CS026	N/A	1.9097
PM10CS028	0.8671	1.4056
PM10CS036	N/A	0.8837

Fuente: Autores.

A continuación, se presenta la gráfica 1, la cual muestra la relación entre el BC por el método óptico y los valores de las fotos, para calcular la regresión lineal y obtener el valor de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico.

Grafica 1. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector la Salle PM10



Fuente: Autores.

Tabla 4. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector la Salle PM10.

Código	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10CS001	4.6520	5.3656
PM10CS002	3.7725	3.3996
PM10CS003	2.5978	2.1246
PM10CS004	1.6535	1.3813
PM10CS005	1.7877	1.8903
PM10CS006	0.7153	1.4745
PM10CS009	1.2373	1.3988
PM10CS011	3.3281	4.2355
PM10CS014	0.7552	0.6983
PM10CS016	3.9145	3.5863
PM10CS025	2.4283	2.0936
PM10CS026	2.2896	1.9097
PM10CS028	2.1097	1.4056
PM10CS036	0.7045	0.8837

Fuente: Autores.

4.1.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector la Salle PM10.

A continuación, se comparan los resultados de los tres métodos de medición del BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), método óptico transmisómetro Sootscan OT21, método térmico/óptico y método fotográfico, así mismo se muestra el promedio y la desviación estándar con el fin de obtener el porcentaje de error.

En el proceso de recopilación de los resultados fue necesario descartar algunos filtros ya que no se obtuvieron todos los resultados del método térmico/óptico, los cuales son necesarios para comparar con los otros dos métodos y lograr un análisis óptimo.

Tabla 5. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector la Salle PM10.

Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio	Desviación Estándar	Porcentaje de error
PM10CS001	5.3656	6.2405	4.6520	5.4194	0.7956	14.68%
PM10CS002	3.3996	2.6703	3.7725	3.2808	0.5606	17.09%
PM10CS003	2.1246	1.3140	2.5978	2.0121	0.6492	32.27%
PM10CS004	1.3813	1.3026	1.6535	1.4458	0.1841	12.73%
PM10CS005	1.8903	1.1744	1.7877	1.6175	0.3871	23.93%
PM10CS006	1.4745	1.3366	0.7153	1.1755	0.4044	34.40%
PM10CS011	4.2355	2.9101	3.3281	3.4913	0.6776	19.41%
PM10CS014	0.6983	0.3175	0.7552	0.5904	0.2380	40.31%
PM10CS028	1.4056	0.8671	2.1097	1.4608	0.6231	42.66%

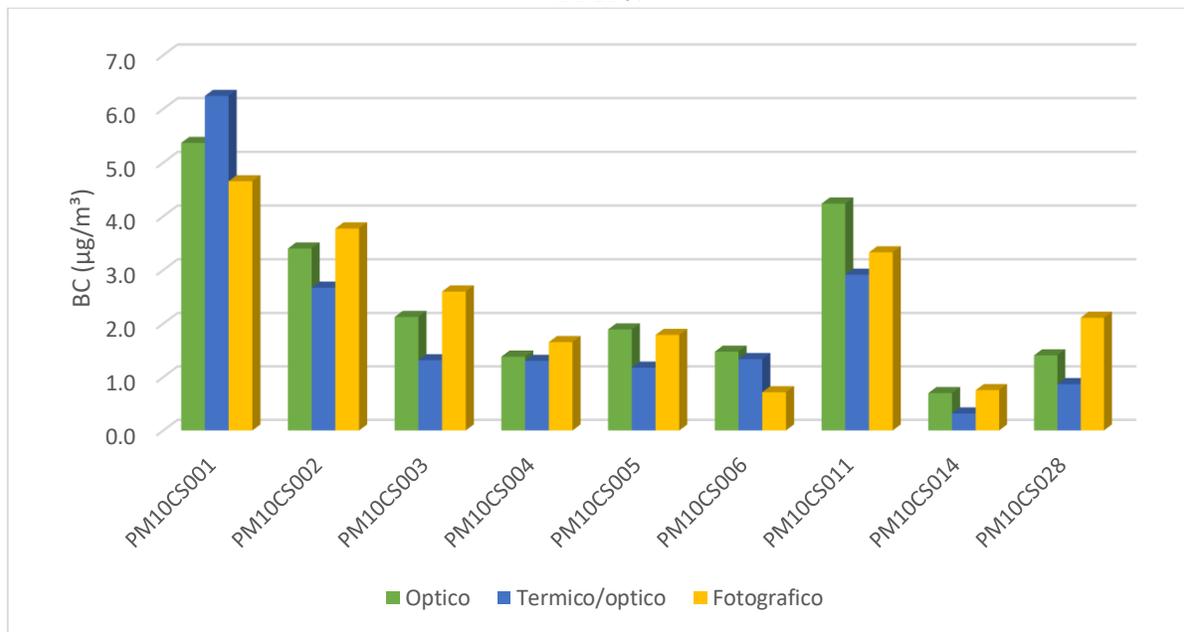
Fuente: Autores.

De acuerdo con el contenido de la tabla 5, en la comparación de los resultados de las técnicas de medición del BC, se observan valores en el porcentaje de error que superan el 20%, lo que significa que uno de los resultados presenta una variación muy grande (BC óptico, EC térmico/óptico o BC fotográfico) sobre los otros dos resultados, o que la variación se puede encontrar en los tres resultados, como fue en el caso del filtro PM10CS028 con un porcentaje de error de 42,66%. A diferencia del filtro PM10CS014 que, aunque posee un porcentaje de error de 40,31% similar al

filtro PM10CS028, su variación se encuentra en el valor de EC $0,3175(\mu\text{g}/\text{m}^3)$. Mientras que los resultados de BC óptico $0,6983(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ y BC fotográfico $0,7552(\mu\text{g}/\text{m}^3)$ tienden a ser semejantes.

En la gráfica 2. Se logra evidenciar las variaciones mencionadas anteriormente de los resultados obtenidos entre las tres técnicas de medición del BC.

Grafica 2. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Salle PM10.



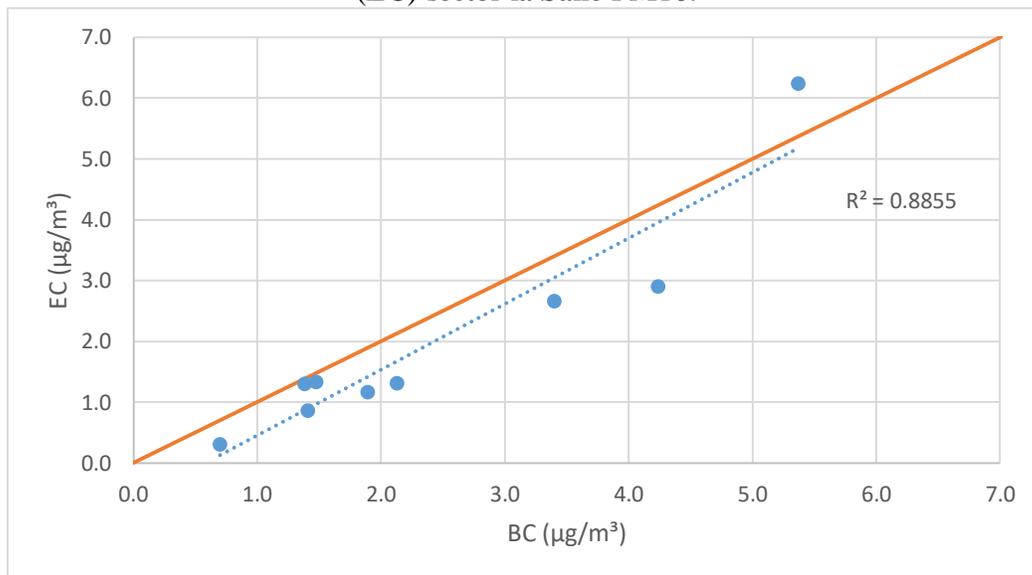
Fuente: Autores.

En el anterior grafico de barras se observa la comparación de los resultados, cabe resaltar la correlación que tiene las técnicas de medición óptico y fotográfico debido a que sus valores finales del método fotográfico vienen de la regresión lineal entre los valores ópticos y los valores fotográficos en ATN, aun así, teniendo en cuenta esta relación, se demuestra que en ciertos filtros como el PM10CS004, PM10CS006 los resultados del método óptico y térmico óptico tienden a ser cercanos. En el filtro PM10CS011 se encuentra la misma similitud en los resultados, pero entre la técnica de medición fotográfica y térmico/óptico.

El grafico de barras demuestra que la relación de los resultados entre las técnicas de medición del BC en los filtros puede llegar a ser similar o cercanos, aunque su metodología o proceso sean muy distintos.

4.1.2 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en PM10 sector la Salle.

Grafica 3. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector la Salle PM10.



Fuente: Autores.

Al analizar la gráfica 3, se representan los valores de EC en el eje Y, los valores de BC en el eje X y una línea $Y=X$ que divide la concentración de EC y BC. Cuando los puntos se encuentran debajo de la línea demuestran que la concentración de BC es superior a la concentración de EC esto es debido a distintos factores, ya sea el aumento de componentes en las muestras de BC ópticas que permiten la absorción de luz aumentando el coeficiente de absorbancia y disminuyendo el de transmitancia , mientras que si los puntos superan la línea naranja significa que las concentraciones de EC son superiores a las del BC, como se representa en el filtro PM10CS001 en este caso la

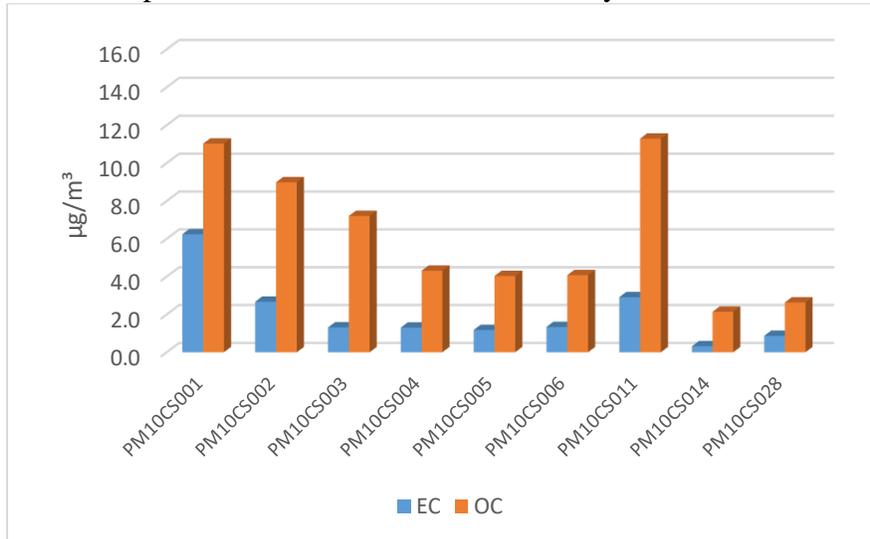
partículas del BC pueden haber envejecido en la atmosfera, interactuando con otras especies y aumentado de tamaño lo cual disminuye su coeficiente de atenuación generando dicho resultado.

A pesar de que la intención de medir BC y EC es similar, las técnicas son diferentes en fundamento de medición, por lo cual no se espera que concuerden exactamente. Mientras que la técnica térmico/óptico elimina cual quiere interferencia causada por especies orgánicas depositas sobre las partículas, la técnica óptica tiene solo la capacidad de medir las propiedades ópticas de las partículas tal como se encuentran suspendidas en la atmosfera, con interferencia de otras especies químicas que hacen parte de la composición del material particulado. Cuando los métodos se correlacionan bien generalmente el material particulado colectado en los filtros es fresco, es decir, no estuvo mucho tiempo suspendido en el aire, lo que limita que especies orgánicas poco volátiles se depositen sobre la superficie de las partículas. Entre mayor sea el tiempo de vida media de las partículas en el aire, mayor será la probabilidad de que los métodos ópticos y térmico/óptico no se correlacionen bien.

Un ejemplo se observa en los filtros PMCS004 y PMCS006 se encuentran sobre la línea $y=x$ lo cual justifica que el día en el que se realizó el muestreo la concentración en el aire de BC y EC eran similares.

4.1.3 Comparación de las concentraciones de EC y OC en el sector la Salle PM10.

Grafica 4. Comparación de la concentración de EC y OC sector la Salle PM10.



Fuente: Autores.

La grafica 4 representa las concentraciones de Elemental Carbon (EC) y Organic Carbon (OC), en donde se demuestra la tendencia que al encontrar grandes cantidades de OC se encuentra menor cantidad de EC en el aire y se relaciona con la gráfica 3, donde se observa que ocho de los nueve filtros se encuentran por debajo de la línea naranja, priorizando la cantidad del BC que se puede medir en el sector la Salle PM10.

4.2 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR LA SALLE PM2.5.

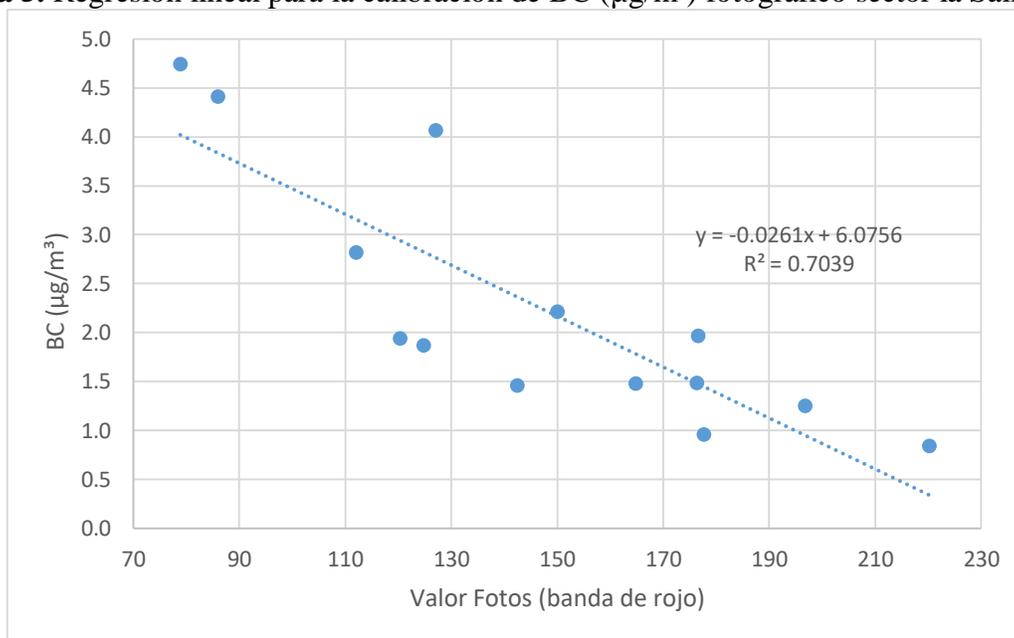
Tabla 6. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector la Salle PM 2.5.

Código	BC (µg/m³)	EC (µg/m³)
PM2.5CS001	4.7474	3.5378
PM2.5CS002	2.8225	2.2572
PM2.5CS003	2.2143	1.5847
PM2.5CS004	1.4639	1.0576

PM2.5CS005	1.9692	1.4264
PM2.5CS006	1.4872	0.9205
PM2.5CS011	4.4117	3.1116
PM2.5CS014	0.8440	0.4837
PM2.5CS016	4.0668	N/A
PM2.5CS024	1.2562	N/A
PM2.5CS025	1.9411	N/A
PM2.5CS026	1.8718	N/A
PM2.5CS028	1.4836	0.9075
PM2.5CS036	0.9601	N/A

Fuente: Autores.

Grafica 5. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector la Salle PM2.5



Fuente: Autores.

Tabla 7. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector la Salle PM 2.5.

Código	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM2.5CS001	4.0181	4.7474
PM2.5CS002	3.1492	2.8225
PM2.5CS003	2.1600	2.2143
PM2.5CS004	2.3569	1.4639
PM2.5CS005	1.4652	1.9692

PM2.5CS006	1.4720	1.4872
PM2.5CS011	3.8317	4.4117
PM2.5CS014	0.3287	0.8440
PM2.5CS016	2.7587	4.0668
PM2.5CS024	0.9375	1.2562
PM2.5CS025	2.9334	1.9411
PM2.5CS026	2.8186	1.8718
PM2.5CS028	1.7722	1.4836
PM2.5CS036	1.4369	0.9601

Fuente: Autores.

4.2.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector la Salle PM2.5.

En la tabla 8, se presentan la misma comparación de los tres métodos de medición del BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), método óptico transmisómetro Sootscan OT21, método térmico/óptico y método fotográfico, promedio, desviación estándar y porcentaje de error en el sector la Salle PM 2.5.

Tabla 8. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector la Salle PM2.5.

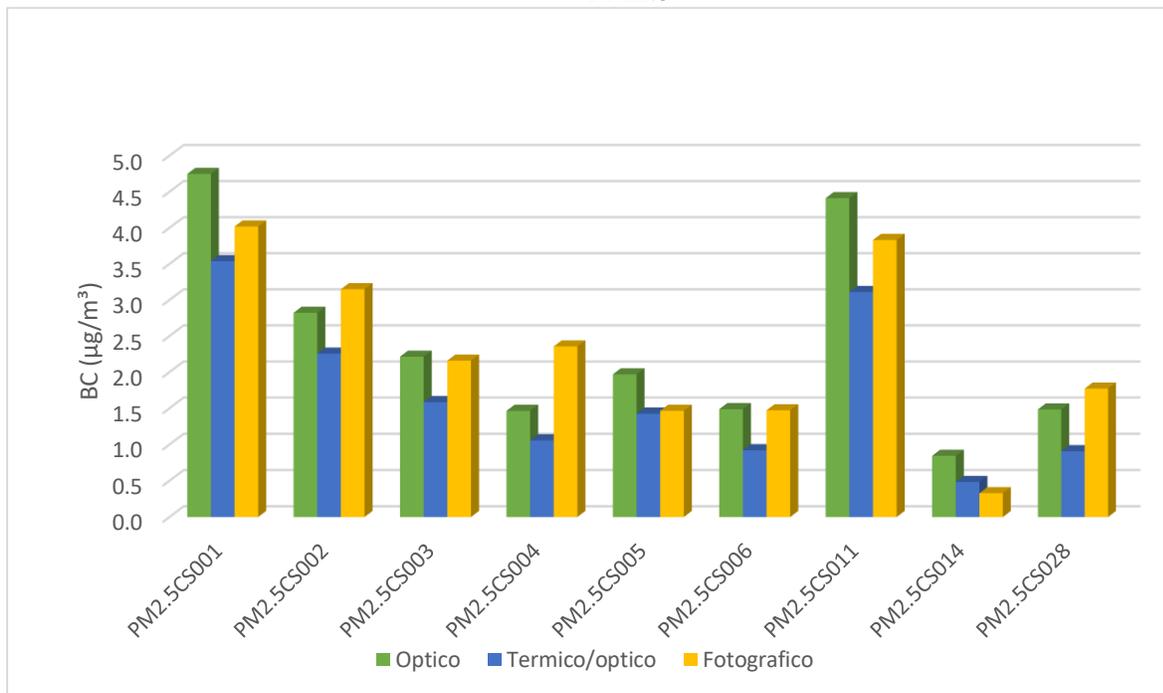
Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio	Desviación Estándar	Porcentaje de error
PM2.5CS001	4.7474	3.5378	4.0181	4.1011	0.6091	14.85%
PM2.5CS002	2.8225	2.2572	3.1492	2.7430	0.4513	16.45%
PM2.5CS003	2.2143	1.5847	2.1600	1.9863	0.3489	17.56%
PM2.5CS004	1.4639	1.0576	2.3569	1.6261	0.6647	40.87%
PM2.5CS005	1.9692	1.4264	1.4652	1.6203	0.3028	18.69%
PM2.5CS006	1.4872	0.9205	1.4720	1.2932	0.3229	24.97%
PM2.5CS011	4.4117	3.1116	3.8317	3.7850	0.6513	17.21%
PM2.5CS014	0.8440	0.4837	0.3287	0.5521	0.2644	47.89%
PM2.5CS028	1.4836	0.9075	1.7722	1.3878	0.4403	31.72%

Fuente: Autores.

En la tabla 8, en el filtro PM2.5CS014 se logra evidenciar el porcentaje de error mayor, con un valor de 47,89%. Según los resultados, su variación en los datos se presenta en el valor del BC del método óptico, a diferencia del filtro PM2.5CS004, que por el contrario su porcentaje de error es de 40,87%. Es decir que la variación se encuentra en el resultado del BC fotográfico.

Otro de los aspectos a destacar de la tabla, es la relación de la desviación estándar con el porcentaje de error ya que, en algunos casos, aunque el porcentaje sea menor al 20% la desviación estándar tiende a ser más cercana a 1, evidenciando que los datos están dispersos pero el margen de error es aceptable.

Grafica 6. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Salle PM2.5



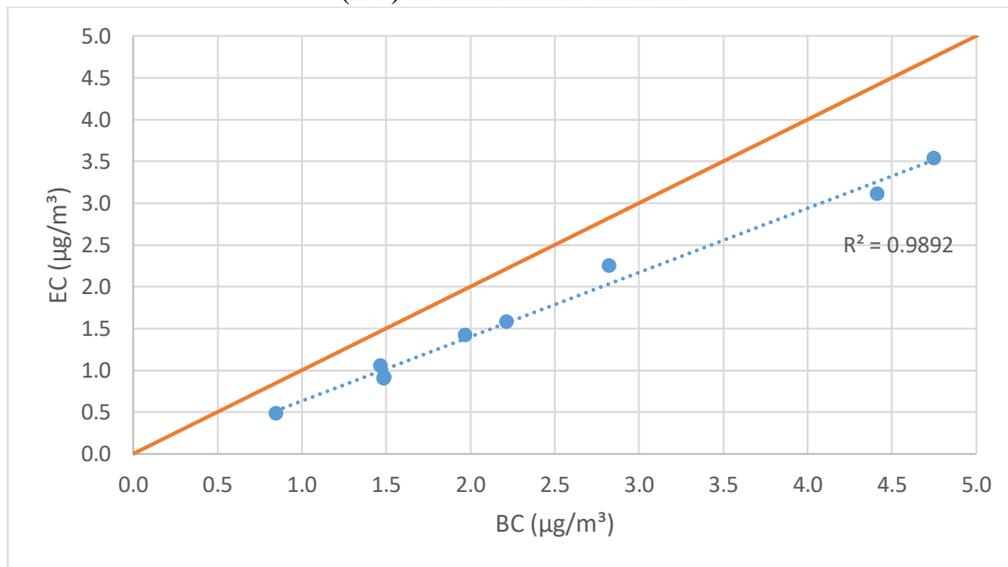
Fuente: Autores.

En la gráfica 6 el objetivo consiste en la comparación de los resultados de las técnicas de medición del BC, se puede observar en la gráfica que hay una tendencia en los resultados de la técnica de medición térmico-óptica, donde se evidencia valores menores a las otras dos técnicas (óptico y fotográfico), esto debido al proceso térmico en el cual se somete a temperaturas altas y puede eliminar compuestos que influyen en los resultados. No obstante, en el filtro PM2.5CS014 se caracteriza porque los resultados del método térmico/óptico son mayores al método fotográfico.

En el filtro PM2.5CS005 se observa una similitud en los resultados de las técnicas de medición del BC térmico/ópticas y fotográficas, por una diferencia de 0,0412 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

4.2.2 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptica (BC) y térmico/óptico (EC) en PM2.5 sector la Salle.

Grafica 7. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector la Salle PM2.5.

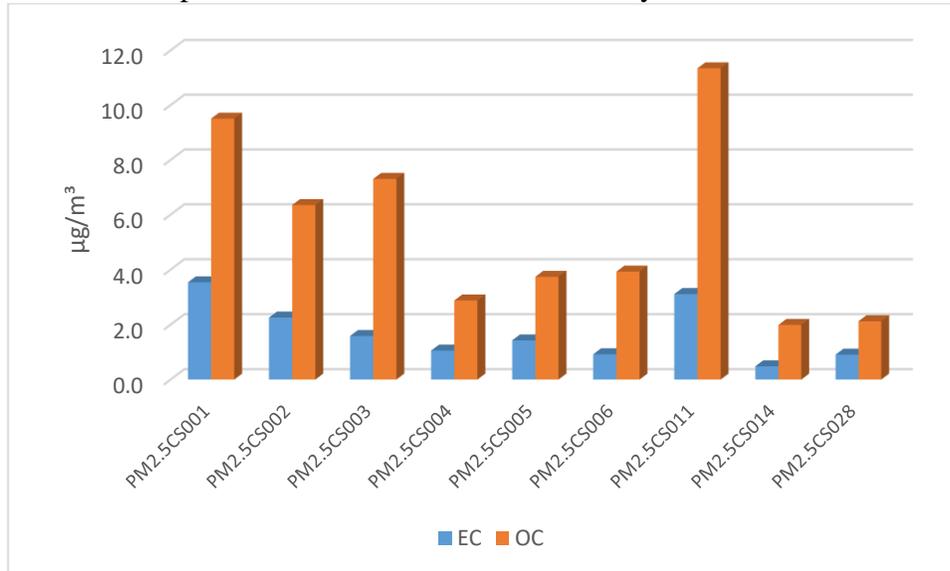


Fuente: Autores.

Para el caso del sector la Salle PM2.5, en el cual se relaciona la concentración del BC y EC en los días donde se hicieron muestreo simultaneo, demuestran que hubo mayor concentración del BC en el aire a comparación del EC, en el artículo de (Ahmed, y otros, 2009) se menciona que las partículas del BC que tienen una mezcla interna de partículas absorbente con un recubrimiento no absorbente da como resultado una absorción mejorada y esto se corrobora en la gráfica ya que los puntos se encuentran por debajo de la línea naranja.

4.2.3 Comparación de las concentraciones de EC y OC en el sector la Salle PM2.5.

Grafica 8. Comparación de la concentración de EC y OC sector la Salle PM2.5.



Fuente: Autores.

En el anterior gráfico de barras se muestran las concentraciones de OC y EC donde se observa que las concentraciones de OC son superiores a las de EC, esto demuestra que a la hora de realizar el muestro las concentraciones de material orgánico en el aire del sector de la Salle fueron mayores, dando como resultado valores menores de EC, esto se encuentra relacionado con la gráfica 7, donde ve que los puntos que representan los filtros están por debajo de la línea naranja dando prevalencia a los resultados obtenidos por el método de óptico.

4.3 COMPARATIVO Y COMPOSICIÓN DE ELEMENTAL CARBON EN EL SECTOR LA SALLE PM10 Y PM2.5.

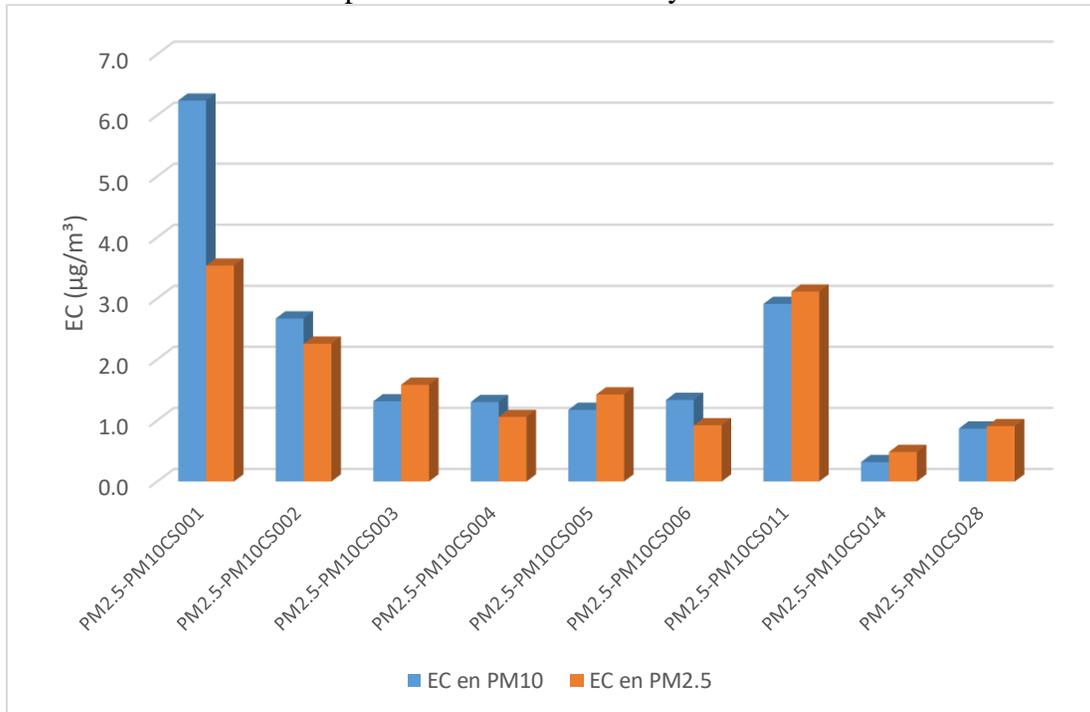
Tabla 9. Valores de Elemental Carbon (EC) en PM10 y PM2.5 sector la Salle.

	PM10 (EC) µg/m³	PM2.5 (EC) µg/m³	EC/PM10	EC/PM2.5
PM2.5-PM10CS001	6.2405	3.5378	13,79%	10,84%
PM2.5-PM10CS002	2.6703	2.2572	6,31%	7,53%
PM2.5-PM10CS003	1.3140	1.5847	4,24%	5,79%
PM2.5-PM10CS004	1.3026	1.0576	10,24%	10,48%

PM2.5-PM10CS005	1.1744	1.4264	8,20%	12,84%
PM2.5-PM10CS006	1.3366	0.9205	6,52%	6,71%
PM2.5-PM10CS011	2.9101	3.1116	5,76%	7,73%
PM2.5-PM10CS014	0.3175	0.4837	3,55%	5,78%
PM2.5-PM10CS028	0.8671	0.9075	9,21%	11,32%

Fuente: Autores.

Grafica 9. Comparativo de EC en PM10 y PM2.5 sector la Salle.

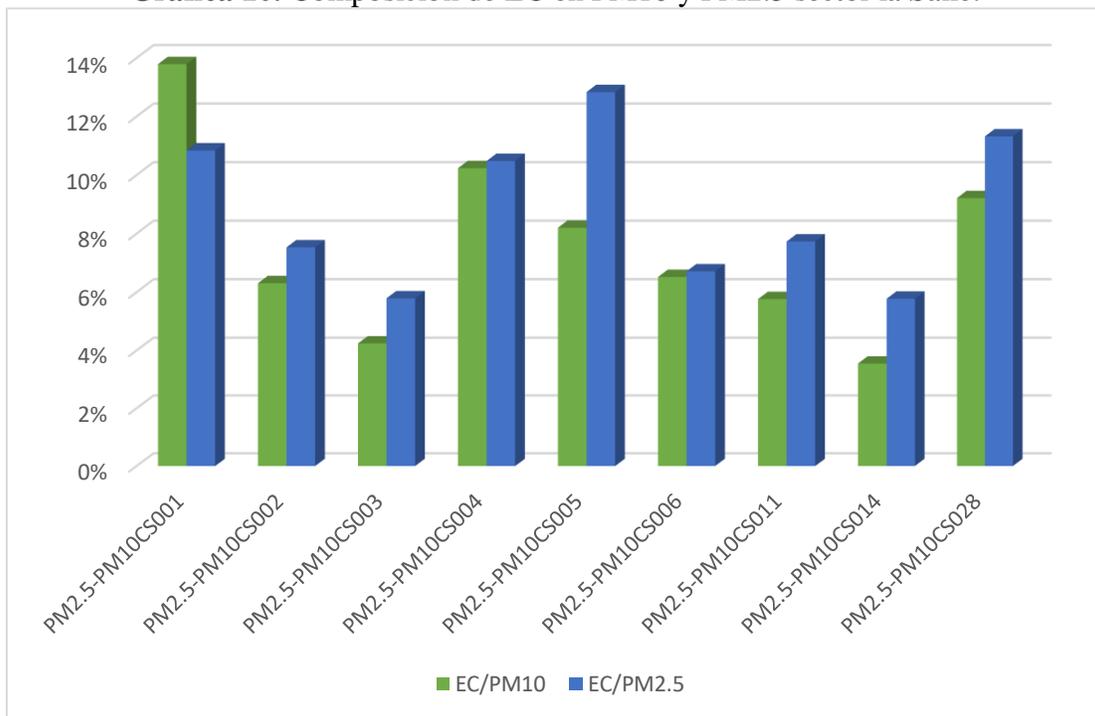


Fuente: Autores.

En la gráfica 9, se observa la comparación de las concentraciones de EC en los tamaños PM10 y PM 2.5, en primera instancia se puede notar que hay mayor concentración en PM10 debido a que en el filtro CS001 se encuentra una diferencia entre los valores de EC, pero a medida que se observa los otros filtros se refleja que en 5 de los 9 filtros que se compararon, hay mayor cantidad de EC en las mediciones de PM2.5. Esto es debido a que el tamaño de las partículas de EC en estado puro es más pequeño y al realizar la toma de muestra en PM2.5, se eliminan las partículas de tamaños superiores. Cabe anotar que el BC se encuentra principalmente en la porción fina del PM, con

partículas de tamaños situados en la escala nanométrica, por lo tanto, es de esperarse que el radio EC/PM2.5 sea levemente al de EC/PM10.

Grafica 10. Composición de EC en PM10 y PM2.5 sector la Salle.



Fuente: Autores.

La grafica 10 representa la concentración de EC en porcentaje de la concentración total de los filtros en PM10 y PM2.5. Como se explica anteriormente en la gráfica 9, la composición de EC debe ser mayor en PM2.5 esto se expresa de manera adecuada en la gráfica 10, excepto por el filtro CS001 en el cual la composición de EC prevalece en porcentaje mayor en PM10.

4.3.1 Relación entre las mediciones en PM10 y PM2.5 de OC/EC en el sector la Salle.

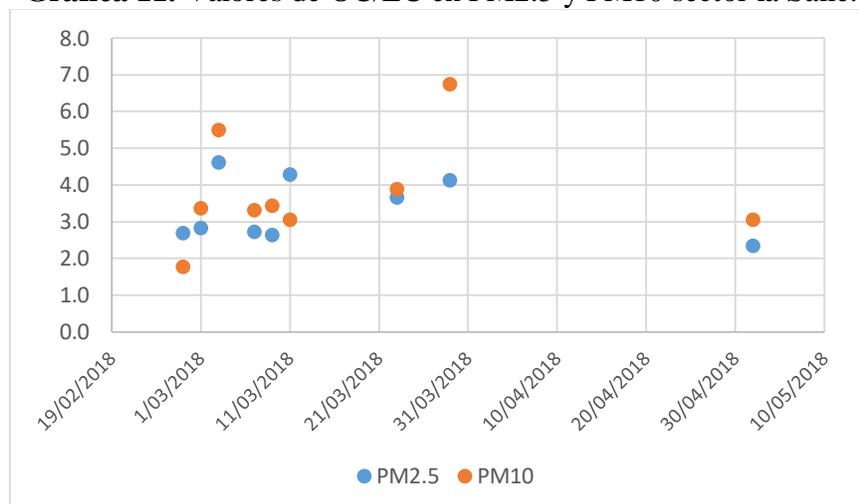
Tabla 10. Valores de PM2.5 y PM10 (OC/EC) sector la Salle.

	Colegio La Salle	
	OC/EC	
	PM2.5	PM10
27/02/2018	2,6876	1,7669
1/03/2018	2,8136	3,3636
3/03/2018	4,6105	5,4798
7/03/2018	2,7217	3,3081
9/03/2018	2,6227	3,4312
11/03/2018	4,2682	3,0482
23/03/2018	3,6464	3,8787
29/03/2018	4,1103	6,7379
2/05/2018	2,3383	3,0364

Fuente: Autores.

En la tabla 10. Se observa la relación entre OC/EC en las mediciones de PM10 y PM2.5 en el sector la Salle. El propósito de esta relación es conocer en cuál de las escalas de medición (PM10 y PM2.5) se encuentra mayor cantidad del BC de origen fósil. A continuación, se encuentra la gráfica 11 donde se graficaron los resultados de la tabla 10.

Gráfica 11. Valores de OC/EC en PM2.5 y PM10 sector la Salle.



Fuente: Autores.

Al observar la gráfica 11 se puede destacar que la mayoría de las mediciones en el sector se realizaron entre las fechas del 1 de marzo al 11 de marzo del 2018. Al realizar un promedio de los datos totales, el resultado en PM10 es de 3,7834 y en PM2.5 de 3,3133, lo que significa que no hay gran diferencia entre los resultados, ya que la mayoría de las especies orgánicas y del BC se encuentran en la fracción fina del PM, por lo tanto, en el PM10 se van a encontrar más sustancias inorgánicas que en el PM 2.5.

Según el artículo (Zeng & Wang, 2011), si la relación entre OC/EC posee un valor < 2.5 , el origen del BC es de combustible fósil mientras que si es superior puede provenir de la quema de biomasa.

En el caso de PM10 y PM2.5 en los promedios se deduce que se trataría de origen de la quema de biomasa, no obstante, al revisar la gráfica 11 y la tabla 10 se puede decir que en ambas mediciones se encontraban valores < 2.5 , como es el caso en PM10 en el día 27/02/2018 y el PM2.5 en el día 02/05/2018.

4.3.2 Análisis de la composición de las mediciones en PM10 y PM2.5 en el sector la Salle.

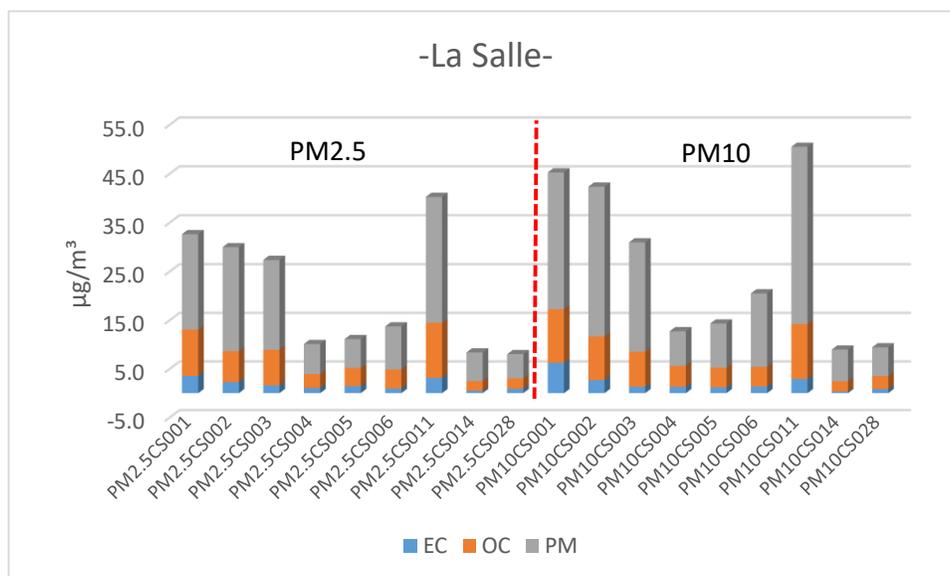
Tabla 11. Resultados de EC, OC y PM en el sector la Salle.

Código	EC	OC	PM	PM-(EC+OC)
PM2.5CS001	3.538	9.508	32.628	19.583
PM2.5CS002	2.257	6.351	29.968	21.360
PM2.5CS003	1.585	7.306	27.366	18.475
PM2.5CS004	1.058	2.878	10.091	6.154
PM2.5CS005	1.426	3.741	11.111	5.944
PM2.5CS006	0.920	3.929	13.714	8.865
PM2.5CS011	3.112	11.346	40.246	25.789
PM2.5CS014	0.484	1.988	8.375	5.903
PM2.5CS028	0.908	2.122	8.015	4.985
PM10CS001	6.241	11.026	45.253	27.987
PM10CS002	2.670	8.982	42.348	30.696
PM10CS003	1.314	7.200	30.961	22.447
PM10CS004	1.303	4.309	12.723	7.111
PM10CS005	1.174	4.030	14.317	9.113

PM10CS006	1.337	4.074	20.504	15.094
PM10CS011	2.910	11.287	50.486	36.288
PM10CS014	0.318	2.140	8.950	6.493
PM10CS028	0.867	2.633	9.412	5.912

Fuente: Autores.

Grafica 12. Composición de las mediciones de PM 2.5 y PM 10 en el sector la Salle.



Fuente: Autores.

En la tabla 11, se observan los resultados de EC, OC y PM, el cual es la concentración total que se obtuvo de la recolección de los filtros. Por otro lado, se encuentra en la última columna la operación $(EC+OC)-PM$, esta operación se ejecuta con el fin de separar EC, OC y obtener el material particulado.

Así en la gráfica 12, se logra analizar que está dividida en dos, mitad para PM2.5 y la otra para PM10 lo que significa que la composición se refleja en la cantidad de EC en azul, OC en naranja y PM en gris. Con lo cual se puede deducir que más de la mitad de la composición del PM, sea de 10 o 2.5 nanómetros (μg) de diámetro corresponde a especies inorgánicas, probablemente iones sulfatos, nitratos, especies metálicas, entre otros.

Es importante resaltar que estas proporciones se mantienen en todos los filtros, es decir no importa el tamaño de la muestra, lo que verdaderamente importa es que las proporciones se mantienen en sus niveles de composición.

4.4 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR BOMBEROS PM10.

En el Anexo A la tabla 2 se encuentran la recopilación de datos en el sector bomberos, no obstante, en esta tabla se presentan algunos valores en IR, los cuales son denominados “TOO DARK” o “MUY OSCURO”. El significado de esta palabra hace referencia a que en el momento en el que el filtro paso por el transmisómetro no fue posible cuantificar los valores de IR (ATN), ya que la muestra superaba los rangos de medición en la escala del transmisómetro Sootscan OT21.

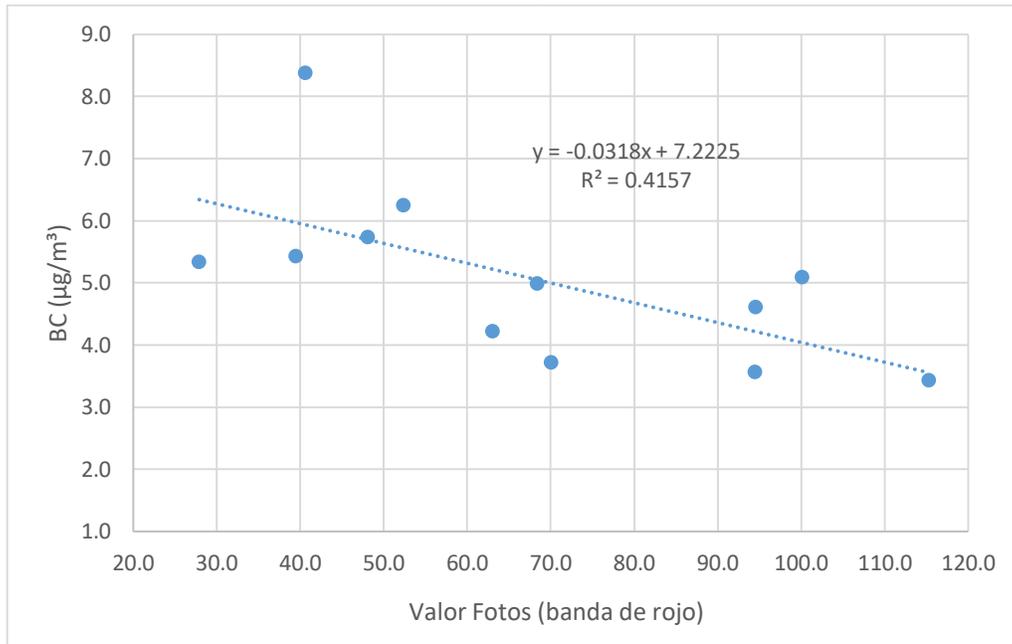
Por lo tanto, más adelante en la tabla 16, se logra encontrar que los valores del BC óptico son iguales a los valores de EC, con el fin de poder realizar la regresión lineal entre la relación de los datos del BC óptico y los valores fotográficos (ATN) para así obtener los valores del BC fotográfico con la mayor cantidad de datos posibles.

Tabla 12. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC) y BC óptico en el sector Bomberos PM10.

Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10BF001	ELD	8.3846	8.3846
PM10BF002	ELD	4.9911	4.9911
PM10BF003	6.2543	4.8886	6.2543
PM10BF004	5.0913	5.1809	5.0913
PM10BF005	5.4298	7.5663	5.4298
PM10BF006	3.4401	2.7220	3.4401
PM10BF009	4.6113	N/A	4.6113
PM10BF011	ELD	5.3368	5.3368
PM10BF014	3.5703	N/A	3.5703
PM10BF024	3.7257	N/A	3.7257
PM10BF028	5.7449	5.7935	5.7449
PM10BF036	4.2267	N/A	4.2267

Fuente: Autores.

Grafica 13. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector Bomberos PM10.



Fuente: Autores.

En la gráfica 13, se encuentra la regresión lineal del sector bomberos PM10. Para esta regresión lineal se usaron los valores encontrados en la tabla 12, del BC óptico y valores fotográficos (ATN). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, algunos valores tienen la denominación “too dark” y por ende se reemplazaron por valores de EC para lograr realizar la gráfica y obtener los valores del BC del método fotográfico.

Se presentaron algunas alteraciones en los resultados finales, aun así, en la gráfica se puede evidenciar el R^2 el cual tiene un valor de 0,4157, aunque sea un valor no aceptable para la regresión, en el experimento es aceptable para observar los resultados obtenidos por este.

Tabla 13. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado y método óptico en el sector Bomberos PM10.

Código	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10BF001	5.9318	8.3846
PM10BF002	5.0483	4.9911
PM10BF003	5.5576	6.2543

PM10BF004	4.0391	5.0913
PM10BF005	5.9686	5.4298
PM10BF006	3.5555	3.4401
PM10BF009	4.2171	4.6113
PM10BF011	6.3362	5.3368
PM10BF014	4.2187	3.5703
PM10BF024	4.9945	3.7257
PM10BF028	5.6937	5.7449
PM10BF036	5.2188	4.2267

Fuente: Autores.

4.4.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector Bomberos PM10.

Tabla 14. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector Bomberos PM10.

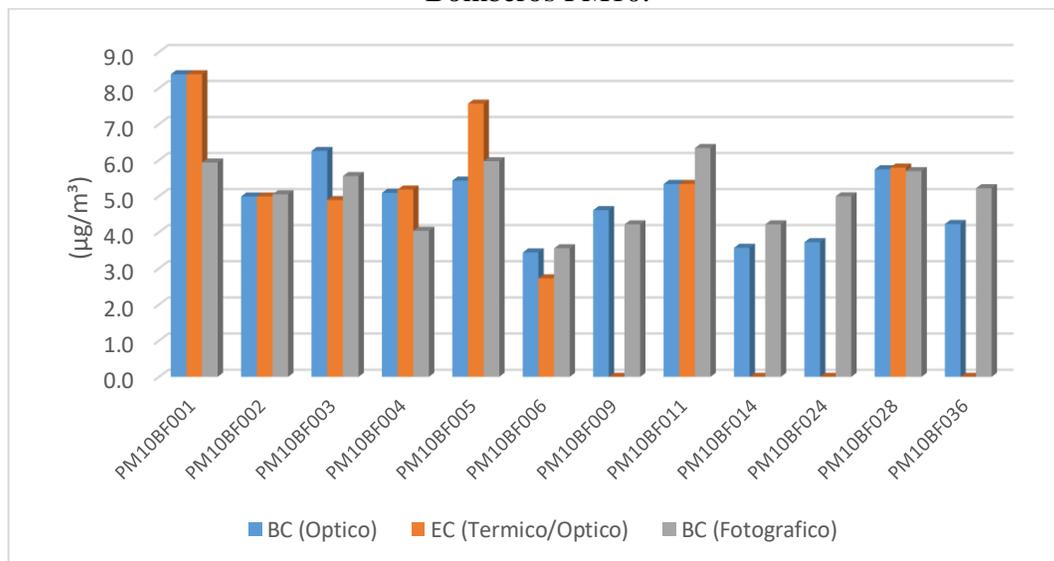
Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio	Desviación Estándar	Porcentaje de error
PM10BF001	8.3846	8.3846	5.9318	7.5670	1.4161	18.71%
PM10BF002	4.9911	4.9911	5.0483	5.0102	0.0331	0.66%
PM10BF003	6.2543	4.8886	5.5576	5.5668	0.6829	12.27%
PM10BF004	5.0913	5.1809	4.0391	4.7704	0.6349	13.31%
PM10BF005	5.4298	7.5663	5.9686	6.3216	1.1111	17.58%
PM10BF006	3.4401	2.7220	3.5555	3.2392	0.4516	13.94%
PM10BF009	4.6113	N/A	4.2171	2.9428	2.5562	86.86%
PM10BF011	5.3368	5.3368	6.3362	5.6699	0.5770	10.18%
PM10BF014	3.5703	N/A	4.2187	2.5963	2.2717	87.50%
PM10BF024	3.7257	N/A	4.9945	2.9067	2.5960	89.31%
PM10BF028	5.7449	5.7935	5.6937	5.7440	0.0499	0.87%
PM10BF036	4.2267	N/A	5.2188	3.1485	2.7714	88.02%

Fuente: Autores.

En la tabla 14 se realizó la comparación de las técnicas de medición del BC. Se puede observar que en algunos filtros (PM10BF009-PM10BF014-PM10BF024 y PM10BF036) no se presentan los valores de EC del método térmico óptico debido a que estos filtros no se analizaron y al calcular el porcentaje de error, los valores fueron superiores a un 85%. Por otro lado, se observó los filtros

que poseen los tres resultados de las técnicas de medición del BC. Se puede deducir que sus porcentajes de error están por debajo del 20%, lo cual hace referencia a datos aceptables, aun así, la desviación estándar en algunos casos presenta una dispersión de dichos datos.

Grafica 14. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Bomberos PM10.



Fuente: Autores.

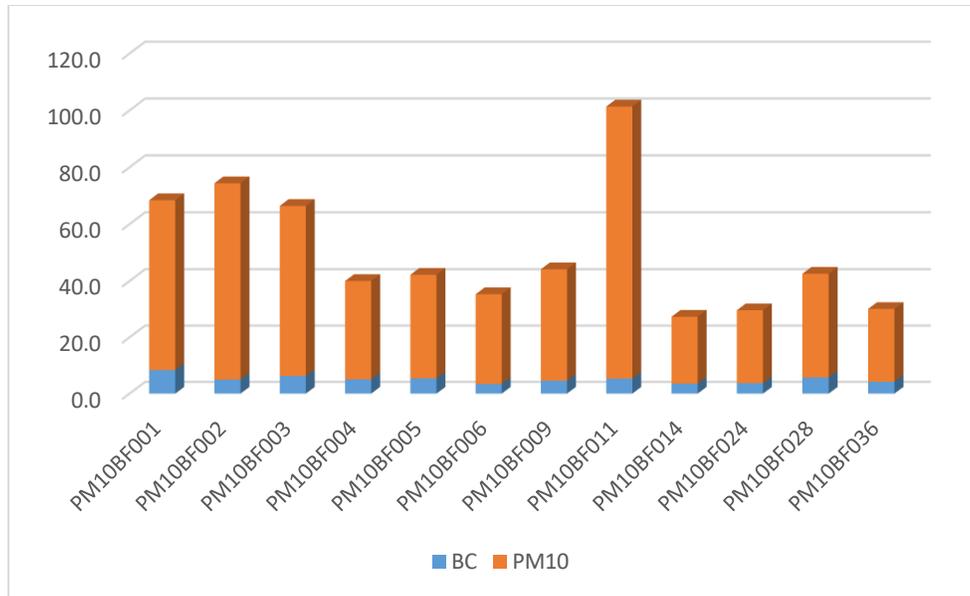
En la gráfica 14 de barras se presentan todos los filtros de la tabla 16, en esta se logra observar los filtros mencionados anteriormente, los cuales no poseen los valores de EC que están representados por la barra de color naranja.

También se refleja la igualdad entre algunos valores del BC óptico y EC térmico/óptico ya mencionado anteriormente el factor de por qué sucede, sin embargo, se encuentra ciertos puntos del experimento que, sin ser sobrepuestos los valores, son semejantes. En el caso del filtro PM10BF028 donde los tres resultados de las distintas técnicas llegan a un valor muy similar su desviación es apenas del 0,0499 esto da a entender que hay una igualdad, aunque sea difícil debido a la diferencia de los métodos se puede llegar a los mismo resultados, ahora si se observa la tabla 15, se puede verificar que el filtro PM10BF002 presenta una desviación estándar menor del 0,0331

pero al ver la gráfica 14, se deduce que los valores del método óptico y térmico/óptico son iguales, por ende aunque su desviación estándar es menor a la del filtro PM10BF028 no representa una clara comparación debido al factor mencionado anteriormente de porque sus valores son iguales.

4.4.2 Contenido del BC en el sector Bomberos PM10.

Gráfica 15. Contenido de las concentraciones de BC en PM10 sector Bomberos.



Fuente: Autores.

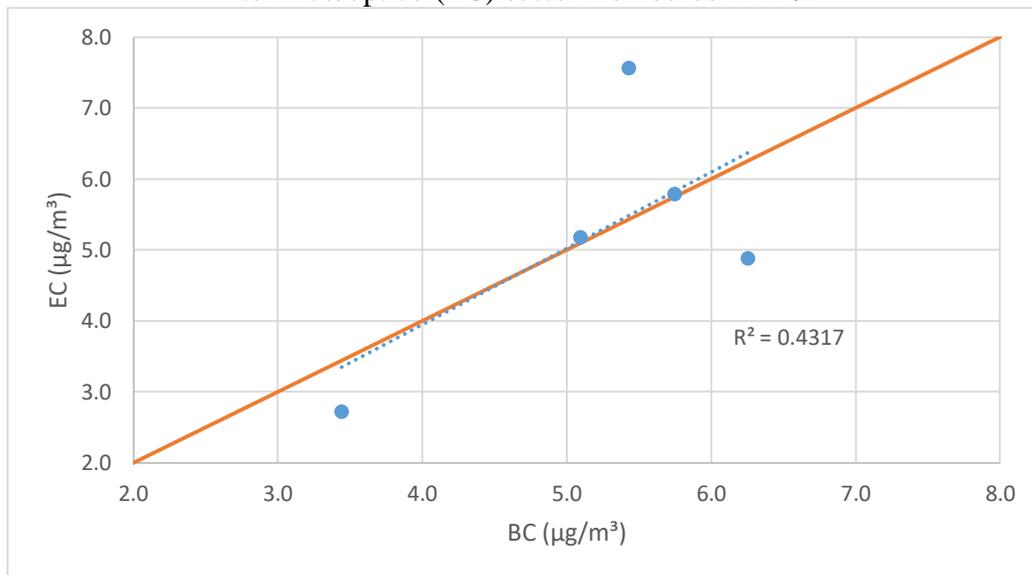
En la gráfica anterior se muestra la concentración del BC en el material particulado PM10 sector Bomberos, en el filtro PM10BF001 se puede observar que hubo mayor cantidad del BC en comparación a los demás filtros.

En la tabla 6 y la tabla 3 se encuentra la columna de resultados del BC del método óptico del sector la Salle PM2.5 y PM10 respectivamente. Los rangos aproximados en el sector la Salle PM10 son alrededor de 0,6983 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a 5,3656 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), en la Salle PM2.5 los rangos son de 0,8440 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a 4,7474 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en el sector Bomberos son de 3,4401 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) a 8,3846 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). La razón por la cual en el sector Bomberos los rangos son más altos puede ser debido a que, en el

sector se encuentre alguna fuente de quema de combustible fósil, a diferencia del sector la Salle donde el PM es distribuido por las corrientes de aire debido a su baja concentración.

4.4.3 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en el sector Bomberos PM10.

Grafica 16. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector Bomberos PM10.



Fuente: Autores.

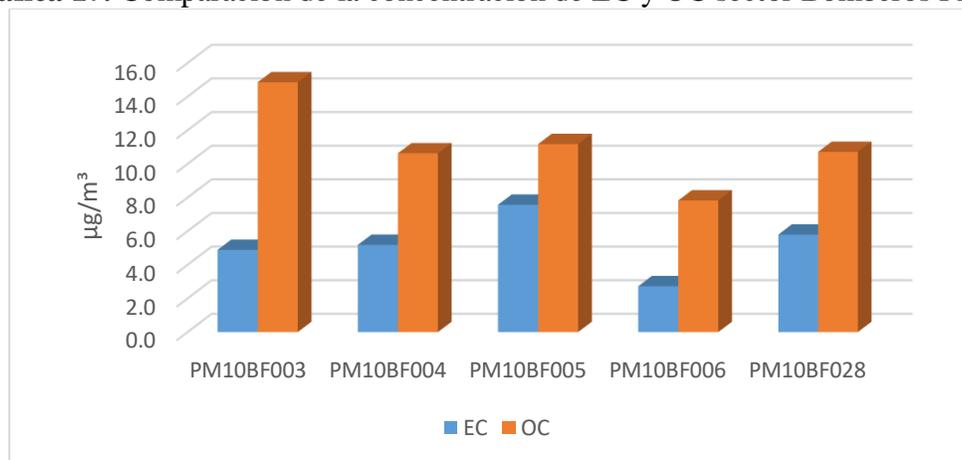
La grafica 16 refleja una relación entre los valores de EC, BC y se encuentra dividida por una línea naranja. Los valores por encima dan a entender que las mediciones de EC por el método térmico/óptico son mayores a las del BC por el método óptico en la misma fecha en la cual se realizó el muestreo, esto sucede de la misma forma, pero viceversa en el caso que los puntos estén por debajo de la línea naranja. Si se observa la gráfica se encuentran los filtros PM10BF003 y PM10BF006 que están por debajo de la línea, lo cual explica que, en esa fecha las mediciones del BC óptico eran superiores a las de EC.

Por el otro lado en el punto PM10BF005, que está por encima de la línea naranja según la gráfica 16 da a entender que en esa fecha los datos de EC eran superiores a los del BC, y el factor clave en la gráfica son los filtro PM10BF004 y PM10BF006 los cuales están sobre la línea naranja esto quiere decir que las fechas de estos filtros tuvieron igual concentración en tanto EC y BC para ambos métodos.

Si se examina en la columna final EC/OC la división entre la cantidad de EC y OC de los resultados del método térmico óptico, se encuentra una cierta relación en la cual los valores del BC óptico son mayores a los de EC. El resultado de la división es menor a cuando los valores de EC son mayores es decir el punto está por encima de la línea divisora naranja, y cuando son similares la división tiende a valores medios.

Como se explica en la gráfica 3 y 7 se encuentran distintos factores que pueden afectar los valores del BC por el método óptico, estos factores pueden ser de las propiedades fisicoquímicas, las mezclas y posible restructuración del BC o simplemente el tiempo que llevan en el aire, tal como se explicó anteriormente.

Grafica 17. Comparación de la concentración de EC y OC sector Bomberos PM10.



Fuente: Autores.

La comparación de las concentraciones de EC y OC van directamente ligadas a la cantidad de EC que se recolecta en los días de muestreo, esto quiere decir que cuando se encuentran altas concentraciones de OC el filtro queda saturado y por ende no se puede obtener gran cantidad material inorgánico (EC).

Se deduce que el día en el que se realizó el muestro, el material orgánico que se adhirió a los filtros fue debido a la quema de combustible fósil, lo cual se puede presentar en mayor medida en el sector Bombero y se demuestra en los valores de OC que están en un rango de 7 a 14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, como se puede evidenciar en la gráfica 17 y en el sector la Salle de un rango de 2 a 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tanto en PM 10 grafica 4 y PM2.5 grafica 9 respectivamente.

4.4.4 Análisis de la composición de las mediciones en PM10 en el sector Bomberos.

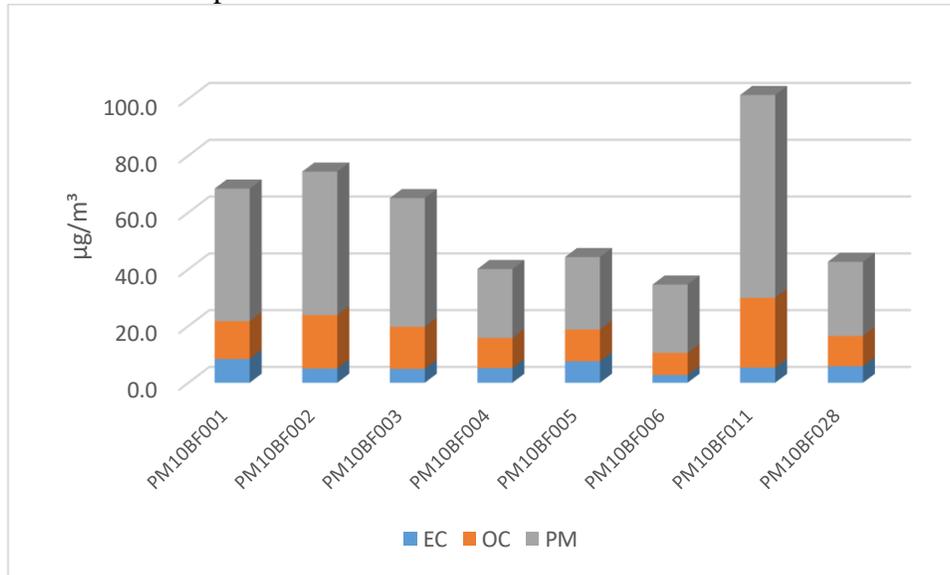
A continuación, se presenta la tabla 15 la cual tiene los resultados de EC, OC del método térmico óptico, así mismo se agregó la concentración total de los filtros y se realizó un cálculo en la última columna para encontrar los elementos del material particulado (PM) con el fin de conocer la composición de las muestras.

Tabla 15. Resultados de EC, OC y PM en el sector Bomberos PM10.

Código	EC	OC	PM	PM-(EC+OC)
PM10BF001	8.385	13.326	68.403	46.693
PM10BF002	4.991	18.866	74.380	50.523
PM10BF003	4.889	14.851	65.056	45.316
PM10BF004	5.181	10.626	40.093	24.286
PM10BF005	7.566	11.174	44.301	25.560
PM10BF006	2.722	7.824	34.606	24.061
PM10BF011	5.337	24.622	101.333	71.375
PM10BF028	5.793	10.709	42.600	26.097

Fuente: Autores.

Grafica 18. Composición de las mediciones de PM10 en el sector Bomberos.



Fuente: Autores.

La composición de los filtros de muestreo se encuentra por tres elementos, el EC, OC y el material particulado PM el cual corresponde a especies inorgánicas, probablemente iones sulfatos, nitratos, especies metálicas, entre otros, mencionadas anteriormente.

Al igual que las gráficas anteriores de composición se demuestra una cierta proporción, en el caso del PM en el sector bomberos se encuentra una tendencia en la cual su porcentaje esta entre 58% al 70% de toda la composición, el OC se encuentra en un rango del 19% al 27% y el EC de un 5% a 17%.

4.5 RECOPIACIÓN DE DATOS Y RESULTADOS EN EL SECTOR MOVILIDAD PM10.

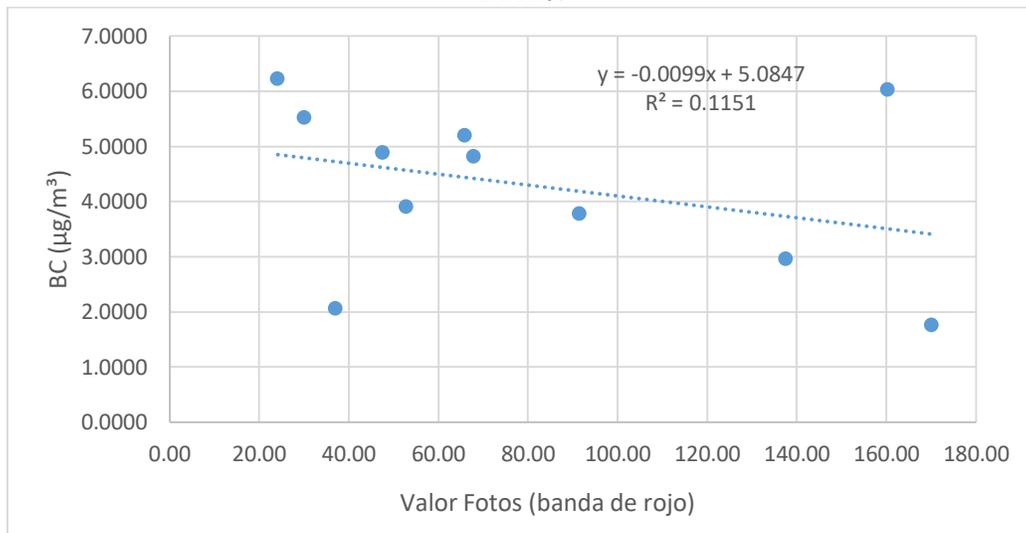
Tabla 16. Recopilación de los valores de Elemental Carbon (EC), valor fotos (ATN) y BC óptico en el sector Movilidad PM10.

Código	BC (µg/m³)	EC (µg/m³)	BC (µg/m³)
PM10SM001	ELD	6.2296	6.2296
PM10SM002	ELD	2.0618	2.0618
PM10SM003	6.0382	4.9396	6.0382

PM10SM004	5.1995	6.4128	5.1995
PM10SM005	4.8266	5.1434	4.8266
PM10SM006	1.7692	1.2059	1.7692
PM10SM009	3.7876	N/A	3.7876
PM10SM014	2.9608	2.1586	2.9608
PM10SM024	3.9125	N/A	3.9125
PM10SM025	ELD	N/A	N/A
PM10SM026	4.8982	N/A	4.8982
PM10SM028	5.5290	6.3709	5.5290

Fuente: Autores.

Grafica 19. Regresión lineal para la calibración de BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) fotográfico sector Movilidad PM10.



Fuente: Autores.

Como se explicó en el sector Bomberos para la tabla 2 del Anexo A, al igual que en el sector Movilidad la tabla 3 del Anexo A, se encontró resultados con la denominación “TOO DARK” por lo tanto, se realizó el mismo procedimiento de reemplazar la denominación por los resultados del método térmico/óptico (EC). Por otro lado, se encontró en la tabla 4 del Anexo B el filtro PM10SM025 el cual, aunque tiene la denominación “TOO DARK” tampoco tiene valores de EC, esto es debido a que el análisis de EC fue realizado en Estados Unidos ya que requiere de un equipo

en especial para la aplicación del método térmico/óptico y por ende se llevaron un cantidad de filtros limitados.

En la gráfica 19 de la regresión lineal entre la relación de los valores del BC óptico y los valores fotos (ATN), para la obtención de resultados del BC por el método fotográfico se encontró un valor de R2 de 0,1151 el cual según la literatura es un valor altamente no aceptable debido a su bajo porcentaje de 11,51%, sin embargo el análisis es aceptable debido a que el proyecto busca la comparación entre los tres métodos y para esto se necesita la mayor cantidad de resultados posibles aunque persista cierta irregularidad en el momento del cálculo.

Tabla 17. Valor BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del método fotográfico calibrado en el sector Movilidad PM10.

Código	BC fotográfico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PM10SM001	4.8462	6.2296
PM10SM002	4.7188	2.0618
PM10SM003	3.4979	6.0382
PM10SM004	4.4334	5.1995
PM10SM005	4.4129	4.8266
PM10SM006	3.4005	1.7692
PM10SM009	4.1799	3.7876
PM10SM014	3.7226	2.9608
PM10SM024	4.5628	3.9125
PM10SM025	4.7897	N/A
PM10SM026	4.6141	4.8982
PM10SM028	4.7869	5.5290

Fuente: Autores.

4.5.1 Comparación de los resultados de los métodos de medición del BC en el sector Movilidad PM10.

Tabla 18. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC en el sector Movilidad PM10.

Código	BC (µg/m³)	EC (µg/m³)	BC fotográfico (µg/m³)	Promedio	Desviación Estándar	Porcentaje de error
PM10SM001	6.2296	6.2296	4.8462	5.7685	0.7987	13.85%
PM10SM002	2.0618	2.0618	4.7188	2.9475	1.5340	52.04%
PM10SM003	6.0382	4.9396	3.4979	4.8252	1.2740	26.40%
PM10SM004	5.1995	6.4128	4.4334	5.3486	0.9981	18.66%
PM10SM005	4.8266	5.1434	4.4129	4.7943	0.3664	7.64%
PM10SM006	1.7692	1.2059	3.4005	2.1252	1.1398	53.63%
PM10SM009	3.7876	N/A	4.1799	2.6558	2.3084	86.92%
PM10SM014	2.9608	2.1586	3.7226	2.9473	0.7821	26.54%
PM10SM024	3.9125	N/A	4.5628	2.8251	2.4681	87.36%
PM10SM025	N/A	N/A	4.7897	1.5966	2.7653	173.21%
PM10SM026	4.8982	N/A	4.6141	3.1708	2.7496	86.72%
PM10SM028	5.5290	6.3709	4.7869	5.5623	0.7926	14.25%

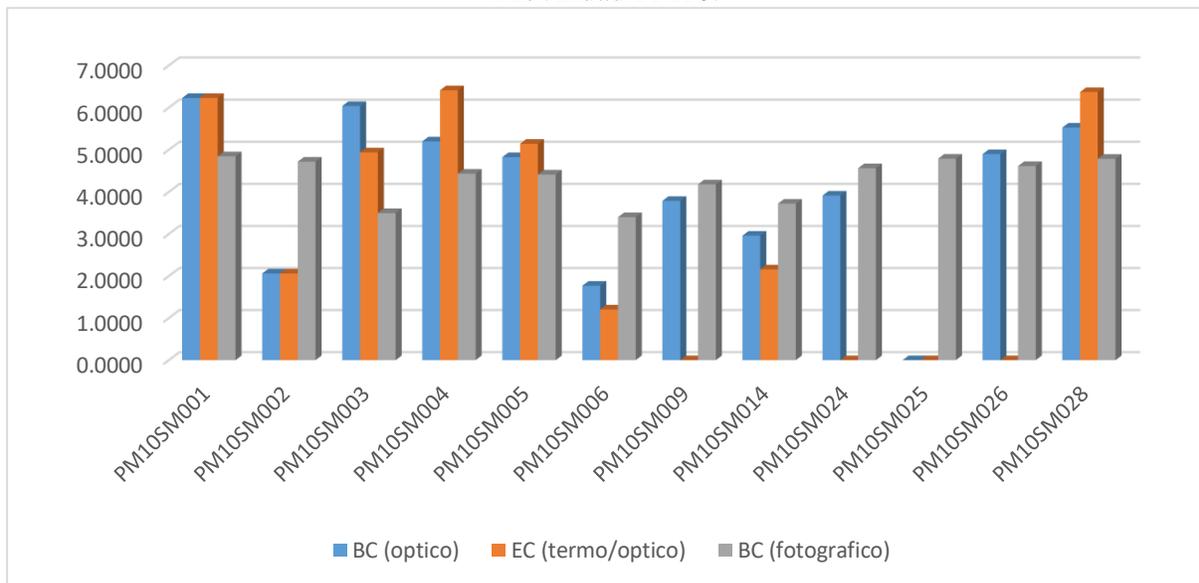
Fuente: Autores.

En la gráfica 19 se tenían ciertas incertidumbres sobre los resultados obtenidos del método fotográfico debido a la irregularidad en el R2. Por otro lado, se puede observar que en la tabla 18 el filtro PM10SM005 tiene valores muy similares, lo cual se evidencia en la desviación estándar de los resultados con un valor de 0,3664 y su porcentaje de error de 7,64% estos valores fueron aceptables y se corrobora que los resultados pueden llegar a ser similares, aunque sus metodologías sean completamente distintas.

Igualmente se encuentran otros filtros con esta característica de similitud en los resultados como el PM10SM028, PM10SM014 y el PM10SM001, este último se le realizó el reemplazo de la denominación “too dark” por el resultado EC del método térmico/óptico.

Así mismo se hallaron factores parecidos al sector bomberos como los valores superiores al 80% en el porcentaje de error, debido a la inexistencia de valores de EC como se explicó anteriormente y un valor de 173,21%, lo cual explica la falta tanto del valor de EC y el del BC por el método óptico.

Grafica 20. Comparación de los resultados de las tres técnicas de medición del BC sector Movilidad PM10.



Fuente: Autores.

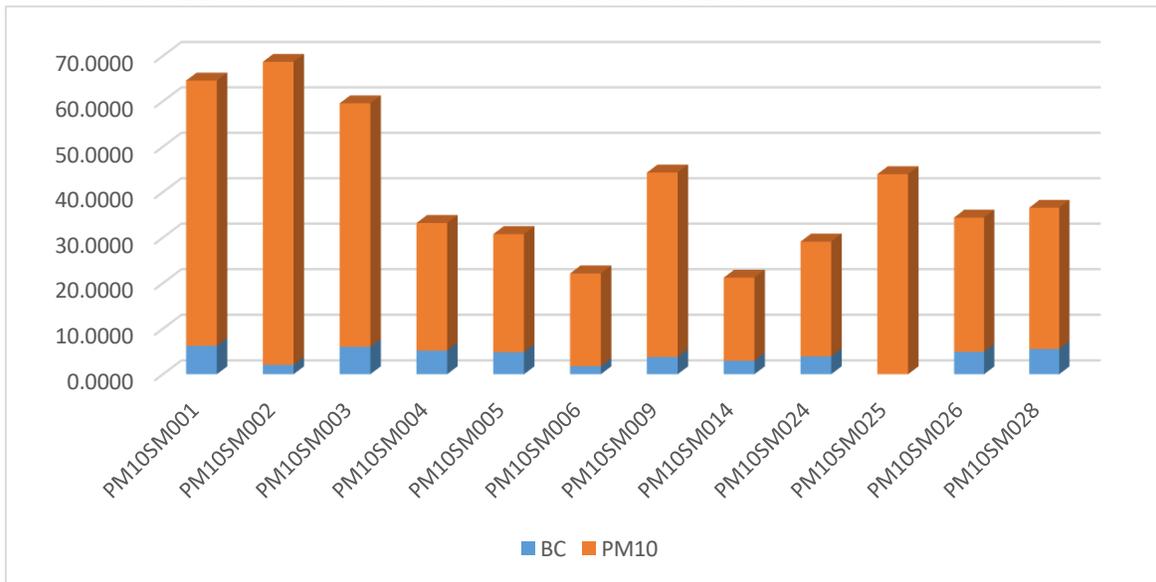
En la gráfica de 20 se refleja la comparación de resultados de las tres técnicas de medición del BC expuesto en la tabla 18. Se puede observar con mayor facilidad los filtros en los cuales se realizó el reemplazo de “too dark” por los valores de EC, en el caso del filtro PM10SM001, PM10SM002 y el caso particular del filtro PM10SM025 donde se ve solo la barra gris que representa BC (fotográfico).

Otro aspecto de la gráfica es la de los resultados del BC fotográfico se observa que solo los filtros que tienen las tres barras que representan las técnicas de medición, en el filtro PM10SM002 la

concentración del BC es mayor en los resultados del método fotográfico teniendo en cuenta que el método óptico es el mismo valor del método térmico/óptico.

4.5.2 Contenido del BC en el sector Movilidad PM10.

Grafica 21. Contenido de las concentraciones de BC en PM10 sector Movilidad.



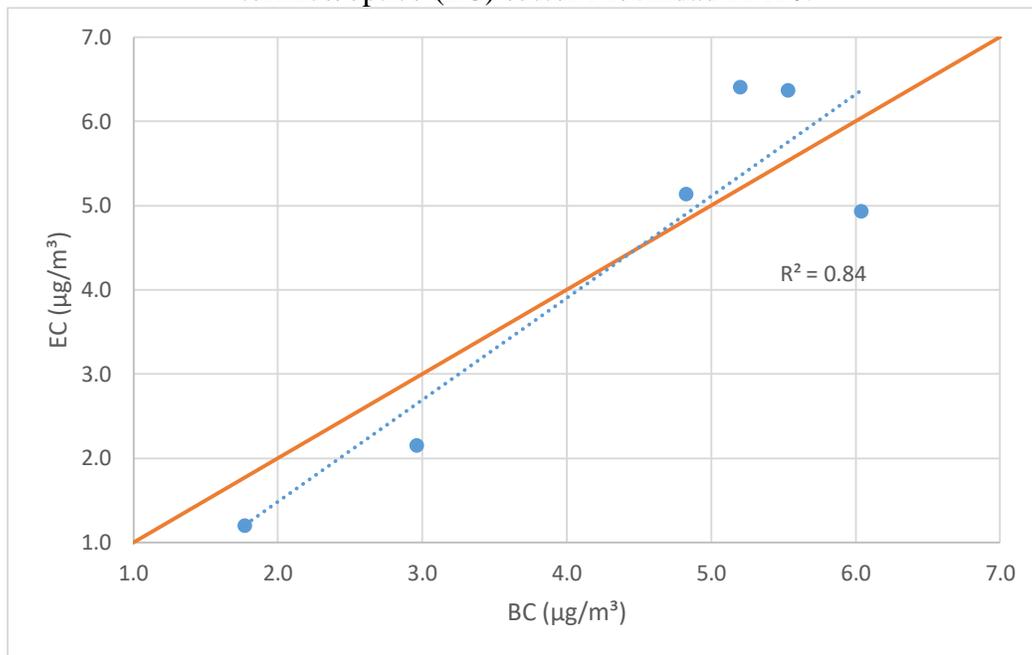
Fuente: Autores.

Las gráficas de contenido de concentraciones del BC en PM10 solo se encuentran para los sectores Bomberos y Movilidad con el fin de conocer en cuál de los dos sectores se encuentra mayor concentración, teniendo en cuenta las fechas en la que se realizaron los muestreos, ya que dependiendo del clima o la estación que se encuentra la ciudad, estas concentraciones pueden variar. De acuerdo con la gráfica 15 del sector Bomberos y la gráfica 21 del sector movilidad, si se realiza un promedio de los resultados se encuentra un valor para Bomberos de 5,0672 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en Movilidad de 3,9344 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), además si se realiza una sobreposición de las gráficas y se toma filtro por filtro, solo en los filtros (PM10BF004 – PM10SM004) , (PM10BF014 – PM10SM014) y (PM10BF036 – PM10SM036) la concentración del sector Movilidad es mayor a la del sector

Bomberos, esto quiere decir que en el sector Bomberos se deben encontrar varias fuentes de emisión de concentración del BC.

4.5.3 Comparativo de los resultados de las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) en el sector Movilidad PM10.

Grafica 22. Relación de los resultados entre las técnicas de medición óptico (BC) y térmico/óptico (EC) sector Movilidad PM10.

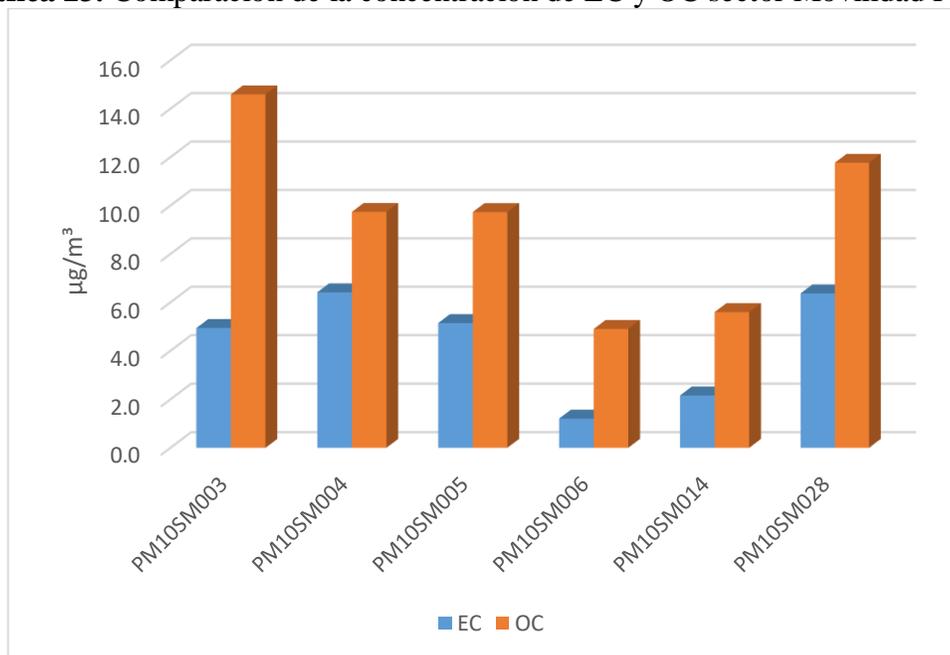


Fuente: Autores.

En contraste con los otros sectores, el sector Movilidad no obtuvo valores iguales en EC y BC, no obstante, fue el único sector el cual sus resultados estuvieron divididos en un 50%, tres de los filtros se encontraron debajo de la línea divisora dando prioridad a la concentración del BC óptico y los otros tres superiores dando prioridad a la concentración de EC térmico/óptico. Sin embargo, se puede catalogar el filtro PM10SM005, el cual fue el más cercano entre los otros seis filtros a la línea naranja y rectifica que la fecha del muestreo, la concentración de EC y BC eran similares en el sector.

A continuación, se presenta la gráfica 23 la cual contiene una comparación entre las concentraciones de EC y OC en el sector Movilidad. El análisis de la gráfica es conocer si la composición de EC y OC afectan en cuanto a las mediciones de la concentración del BC, pero como se observó en los otros sectores la gráfica mantiene la tendencia de mayor concentración en OC, esto solo explica que la concentración en los filtros siempre tendrá mayor cantidad de fracción de carbono orgánico e inorgánico.

Gráfica 23. Comparación de la concentración de EC y OC sector Movilidad PM10.



Fuente: Autores.

4.5.4 Análisis de la composición de las mediciones en PM10 en el sector Movilidad.

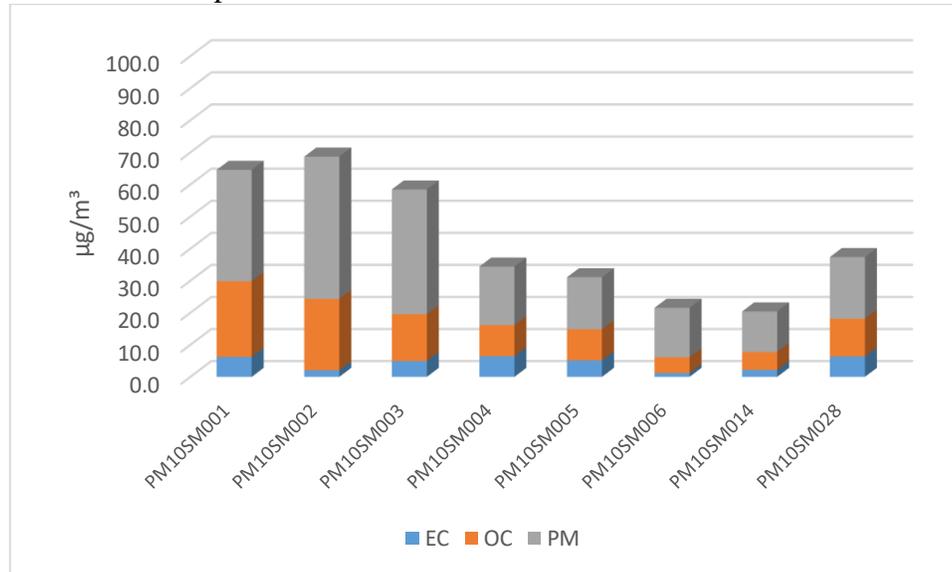
Tabla 19. Resultados de EC, OC y PM en el sector Movilidad.

Código	EC	OC	PM	PM-(EC+OC)
PM10SM001	6.230	23.577	64.548	34.741
PM10SM002	2.062	22.249	68.679	44.368
PM10SM003	4.940	14.592	58.446	38.914
PM10SM004	6.413	9.737	34.403	18.254
PM10SM005	5.143	9.730	31.068	16.195
PM10SM006	1.206	4.899	21.560	15.454
PM10SM014	2.159	5.596	20.396	12.642

PM10SM028	6.371	11.767	37.378	19.240
-----------	-------	--------	--------	--------

Fuente: Autores.

Grafica 24. Composición de las mediciones de PM10 en el sector Movilidad.



Fuente: Autores.

La grafica 24 representa los resultados de la tabla 19, como se explica en los otros sectores la composición de las mediciones del PM10, el propósito de las gráficas es conocer la distribución a la cual se encuentran las partículas y según las otras graficas de los distintos sectores mantienen la misma tendencia y especies inorgánicas.

4.6 ANÁLISIS DE LOS TRES SECTORES (LA SALLE, BOMBEROS Y MOVILIDAD) PARA LAS MEDICIONES EN PM10 DE OC/EC.

Tabla 20. Resultados de OC/EC en los sectores la Salle, Bomberos y Movilidad (PM10).

Date	OC/EC		
	La Salle	Bomberos	Movilidad
3/03/2018	5,4798	3,0380	2,9541
7/03/2018	3,3081	2,0511	1,5184
9/03/2018	3,4312	1,4769	1,8917

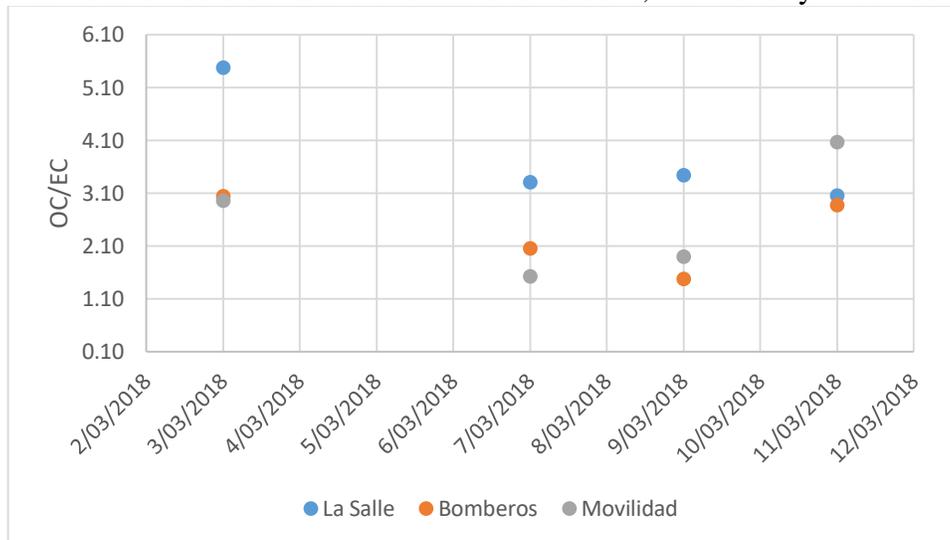
11/03/2018	3,0482	2,8744	4,0630
------------	--------	--------	--------

Fuente: Autores.

En la tabla 20 se reflejan los resultados de la relación entre OC/EC de los tres sectores que se realizaron las mediciones del BC en la escala PM10 y solamente en cuatro fechas en las cuales coincidieron las mediciones de EC.

El propósito de la tabla es conocer el origen del BC en los sectores.

Grafica 25. Relación de OC/EC entre los sectores la Salle, Bomberos y Movilidad (PM10).



Fuente: Autores.

En el artículo (Zeng & Wang, 2011) explica que cuando la relación entre OC/EC es menor a < 2.5 quiere decir que el origen del BC es de combustible fósil y si supera este rango su origen puede venir de la quema de biomasa. Teniendo en cuenta la explicación anterior si se observa la gráfica 25 y la tabla 20 se puede ver que los valores de la Salle son los más altos exceptuando la última fecha y son mayores a 2.5, lo que quiere decir que la principal fuente de emisión del BC en el sector de la Salle es la quema de biomasa. Esto tiene relación con noticias de incendios forestales que se presentaron en los cerros orientales de Bogotá entre los meses de enero a marzo. Solo en los cerros

orientales se han atendido 18 eventos, casi uno diario, que han consumido 43.255 metro cuadrados de vegetación. (ELESPECTADOR, 2019). Por otro lado, los incendios se presentaron también en medio de la emergencia ambiental ante la mala calidad del aire, en el cual se decretó alerta naranja en cuatro localidades del sur de Bogotá (ELESPECTADOR, 2019).

De esta manera también se correlacionan los resultados obtenidos del muestreo del BC en el sector la Salle en donde su valor más alto fue de 6.2045 para PM10 y se dio el 27 de febrero.

4.7 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DEL BLACK CARBON.

El tiempo de vida corto del BC significa que las concentraciones atmosféricas son altas cerca de las fuentes de emisión y temporadas de emisión (Diaz Hernandez , 2016). Como se vio reflejado en el sector la Salle en los periodos de quema de biomasa que se dieron entre enero y febrero, en donde las concentraciones del BC fueron altas. Esta alta variabilidad espacial y temporal afecta el impacto del BC en el clima.

La localización geográfica y la altitud determinan de manera importante el impacto del BC en el clima. Las partículas finas emitidas en la combustión, incluyendo el BC pueden ser transportadas miles de kilómetros lejos de las fuentes de emisión. La partículas tienen un buen efecto en la absorción total de radiación solar por la atmosfera cuando son emitidas en colores claros o transportadas a superficies claras. Además, el efecto radiativo neto del BC puede ser sensitivo a la altura (Diaz Hernandez , 2016).

5. CONCLUSIONES

Se realizó una comparación de los métodos de cuantificación del contenido del BC en las muestras de PM de la ciudad de Bogotá, los resultados obtenidos del BC óptico, EC térmico/óptico y BC fotográfico fueron diferentes entre sí, sin embargo, se pueden usar para futuros estudios de comparación.

En el proyecto se determinó el contenido del BC en tres sectores de la ciudad de Bogotá. Siendo el sector Bomberos la zona en la cual se encontró mayor concentración, demostrando que la quema de combustible fósil genera más emisiones de BC, seguido del sector Movilidad por las fuentes vehiculares y por último el colegio la Salle siendo considerado zona rural.

El proyecto también tenía como objetivo evaluar la distribución espacial y temporal de la concentración del BC, se realizó el muestro entre los meses de febrero a mayo. Evidenciando que en el sector la Salle tanto para PM_{2.5} y PM₁₀ las concentraciones disminuyeron en el transcurso del tiempo a diferencia del sector Bomberos donde las concentraciones fueron inconstantes y no hubo una tendencia particular. Mientras tanto en el sector Movilidad se encontró que de febrero a marzo disminuyeron las concentraciones y de abril a mayo volvieron a aumentar. En cuanto a las concentraciones del BC se presentaron menores en el sector la Salle, esto es debido a que su ubicación se encuentra en un cerro, a diferencia de los otros sectores los cuales son de zona industrial o vehicular, evidenciando así en los resultados del BC que la zona industrial del sector Bomberos genero una diferencia de mayores resultados de concentración del BC que el flujo vehicular del sector Movilidad.

En los tres sectores del muestreo, solo en el sector la Salle se realizó el proceso de medición en dos escalas, PM10 y PM2.5. El propósito era determinar en cuál de las dos escalas exista mayor concentración del BC. Demostrando que en los filtros PM2.5 las concentraciones estaban menos contaminadas de partículas externas permitiendo adherir mayor concentración del BC.

En el proyecto se evidenció que existen factores que intervienen en el momento de realizar las mediciones de concentración del BC, estos factores como la morfología fractal de las partículas, las propiedades físico/químicas, las condiciones ambientales locales (zonas rurales y urbanas), la edad de las partículas o aerosoles, su distribución espacial, entre otras, las cuales pueden alterar la partícula, incrementando o disminuyendo su coeficiente de absorción y los resultados de concentración.

Entre los tres métodos aplicados, el método fotográfico al ser el más novedoso genera mayor controversia en los resultados debido a los errores humanos en la manipulación de la muestra, la toma de fotos y el uso de softwares no capacitados para realizar las mediciones sin embargo sus ventajas radican en la facilidad del método y el bajo gasto económico que representa. Por otro lado, el método óptico de transmisómetro Sootscan OT21, aunque es aceptado por la comunidad científica para la medición del BC y siendo modernamente de fácil acceso para empresas o universidades también tiene errores en su técnica ya que al momento en que el equipo inyecta los rayos de luz IR y UV pueden ser reflejados por material particulado contaminante en las muestras generando cierto grado de incongruencia en los resultados. Finalmente, el método térmico/óptico el cual se considera de mayor influencia en las mediciones de concentración del BC debido a que elimina el material orgánico y permite un análisis más efectivo, no obstante, la única falencia del proceso es la quema total del filtro sin tener la posibilidad de rectificar dicha medición además de mencionar su elevado costo en el mercado.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar más estudios experimentales, exploratorios y comparativos con el fin de comprobar e interpretar las distintas formas en las que se puede complementar el método fotográfico.

Implementar una práctica de laboratorio de contaminación atmosférica en la Universidad Pontificia Bolivariana que se base en el desarrollo de curvas de calibración entre el método fotográfico y el óptico.

Se recomienda el uso de software (Nextleaf BC system) el cual realiza el proceso de extracción de concentraciones del BC de forma sencilla, rápida y evitando la interacción humana en el método fotográfico. Así mismo se plantea realizar la comparación entre el método fotográfico sin software y con software para ver la variación de los resultados.

Se plantea realizar a futuro muestreos más largos de concentraciones del BC, que alcancen a cubrir temporadas secas y húmedas en los mismos sectores de la ciudad de Bogotá con el fin de conocer los cambios en el tiempo.

7. BIBLIOGRAFIA

- Medellin. Andreae & Gelencsér, a. (2006). *Black carbon or brown carbon? The nature of light-absorbing carbonaceous aerosols*. Obtenido de Atmospheric Chemistry and Physics Discussions: <https://doi.org/10.5194/acpd-6-3419-2006>
- Bell, M., Kim, Y., & Dominici, F. (2007). Potential Confounding of Particulate Matter on the Short-Term Association between Ozone and Mortality in Multisite Time-Series Studies. En *Environmental Health Perspectives* (págs. 1591-1595).
- Cole-Parmer. (s.f.). *Filtros de profundidad de PTFE*. Obtenido de https://archive-resources.coleparmer.com/Catalog_pdfs/PDF_CP/JZ_0692.pdf
- Kassianov I., E., C. Barnard , J., & P. Ackerman, T. (2005). *Retrieval of aerosol microphysical properties by using surface MFRSR data: Modeling and observations*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH ATMOSPHERES AN AGU JOURNAL.
- MAGEE SCIENTIFIC . (s.f.). Obtenido de <https://mageesci.com/our-products/ot21/>
- OMS. (2011). *World Health Organization*. Obtenido de <http://www.who.int/>
- Quinn, P., Stohl, A., Arneth, A., & Berntsen, T. (2011). *The impact of black carbon on Arctic climate. Artic Monitoring and Assessment Programme*. Oslo.
- Solaun, K., Sopelana , A., Arraibi, E., & Pérez, M. (Junio de 2014). *Black Carbon y sus efectos en el clima*. Obtenido de <https://www.factorco2.com>
- USEPA. (December de 2009). *Integrated Science Assessment for Particulate Matter*.
- USEPA. (March de 2012). Obtenido de Report to Congress on Black Carbon .
- (n.d.).

(n.d.).

A, V., & Silva, V. (2017). *Determinación de emisiones de carbono negro a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel*. Santiago.

Ahmed, T., Dutkiewicz, V., Shareef, A., Tuncel, G., Tuncel, S., & Husain, L. (2009). *Measurement of black carbon (BC) by an optical method and a thermal-optical method: Intercomparison for four sites*. New York: ELSEVIER.

AINSO. (n.d.). *CONTAMINACION DEL AIRE POR MATERIAL PARTICULADO*. Medellin.

Barlasina, M. E., Carbajal Benitez, G., Perez Fogwill, G., & Asmi, E. (2016). *Medición de Black Carbón en la Estación Marambio en Antártida*.

Bolong, L., Xi-liang, L., Ke, M., & Shu-xuan, L. (n.d.). Pollution characteristics of metal pollutants in PM 2.5 and comparison of risk on human health in heating and nonheating seasons in Baoding, China. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* (pp. 166-171).

BOND, T., Doherty, S., Fahey, D., Forster, P., Berntsen, T., DeAngelo, B., . . . Zender, C. (2013). *Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment*. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: ATMOSPHERES.

Castaño, B., & Bedoya, E. (n.d.). *Evidencia Epidemiológica de Efectos a la Salud de Trabajadores Expuestos al Negro de carbón*. Cartagena.

Chow, J., Watson, J., Pritchett, L., Pierson, W., Frazier, C., & Purcell, R. (n.d.). The DRI thermal optical reflectance carbon analysis system-description evaluation and applications in United States air quality studies. *Atmospheric Environment* 27.

Corporación Ambiental Empresarial . (2017). *Reporte de mediciones de Carbono Negro y PM2.5 en la Ladrillera San Cristóbal, ubicada en la región de Antioquia.*

Diaz Hernandez , C. (2016). *Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos.*

(n.d.). *Elemental Carbon (Diesel Particulate) method 5040, in NIOSH Manual of Analytical Methods.* Cincinnati, Ohio: National Institute for Occupational Safety and health.

ELESPECTADOR. (2019, Enero 24). Retrieved from www.elespectador.com/noticias/bogota

Filtros de profundidad de PTFE. (n.d.). Retrieved from https://archive-resources.coleparmer.com/Catalog_pdfs/PDF_CP/JZ_0692.pdf

Khuzestani, B., Schauer, J., Wei, Y., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2017). *A non-destructive optical color space sensing system to quantify elemental and organic carbon in atmospheric particulate matter on Teflon and quartz filters.* ELSEVIER.

Ministerio de ambiente. (2013). *Contaminación Atmosférica.*

Muñoz Muñoz, M. (2016). *Desarrollo de un sistema basado en análisis por imagen para la obtención de la carga de carbono negro en filtros procedentes de cocinas mejoradas.* Madrid.

Pino Cortes, E., & Diaz Robles, L. (2014). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos y carbón negro desde fuentes antropogénicas para el hemisferio sur.*

Ramanathan, N., Lukac, M., Ahmed, T., Kar, A., Praveen, P., & Honles, T. (2011). *A cellphone based system for large-scale monitoring of black carbon.* ELSEVIER.

- Ramirez , O., Sanchez de la Campa, A., & de la Rosa, J. (2018). *Characteristics and temporal variations of organic and elemental carbon aerosols in a high–altitude, tropical Latin American megacity*. Barranquilla, Colombia y Huelva, España: ELSEVIER.
- Valdebenito Silva, V. A. (2017). *Determinación de emisiones de carbono negro a partir de emisiones de material particulado fino en vehículos diésel*. Santiago.
- Zeng, T., & Wang, Y. (2011). *Nationwide summer peaks of OC/EC ratios in the contiguous United States*. Atlanta, GA, U.S.A: Atmospheric Enviroment .

ANEXOS

ANEXO A. Tablas de recopilación de datos de BC la Salle PM2.5, Bomberos PM10 y Movilidad PM10.

Tabla1. Recopilación de datos y valores del BC por el método óptico en el sector la Salle PM 2.5

Fecha	Código	Concentración PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IR	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27/02/2018	PM2.5CS001	32,6282	231	4,7474
1/03/2018	PM2.5CS002	29,9684	137	2,8225
3/03/2018	PM2.5CS003	27,3661	106	2,2143
7/03/2018	PM2.5CS004	10,0905	71	1,4639
9/03/2018	PM2.5CS005	11,1114	99	1,9692
11/03/2018	PM2.5CS006	13,7143	70	1,4872
23/03/2018	PM2.5CS011	40,2463	217	4,4117
29/03/2018	PM2.5CS014	8,3749	42	0,844
4/04/2018	PM2.5CS016	16,4794	199	4,0668
22/04/2018	PM2.5CS024	5,4654	61	1,2562
24/04/2018	PM2.5CS025	9,2503	96	1,9411
26/04/2018	PM2.5CS026	7,5412	93	1,8718
2/05/2018	PM2.5CS028	8,0148	73	1,4836
20/05/2018	PM2.5CS036	7,0504	44	0,9601

Fuente: Autores.

Tabla 2. Recopilación de datos y valores del BC por el método óptico en el sector Bomberos PM10.

Fecha	Código	Concentración PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IR	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27/02/2018	PM10BF001	684.032	TOO DARK	ELD
1/03/2018	PM10BF002	743.801	TOO DARK	ELD
3/03/2018	PM10BF003	650.562	302	6,2543
7/03/2018	PM10BF004	400.931	246	5,0913
9/03/2018	PM10BF005	443.007	270.3	5,4298
11/03/2018	PM10BF006	346.064	167	3,4401
19/03/2018	PM10BF009	441.271	220.6	4,6113
23/03/2018	PM10BF011	1.013.333	TOO DARK	ELD
29/03/2018	PM10BF014	273.148	177	3,5703
22/04/2018	PM10BF024	309.041	186	3,7257
2/05/2018	PM10BF028	425.995	282.3	5,7449
20/05/2018	PM10BF036	300.966	208	4,2267

Fuente: Autores.

Tabla 3. Recopilación de datos y valores del BC por el método óptico en el sector Movilidad

Fecha	Código	Concentración PM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	IR	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
27/02/2018	PM10SM001	645.477	TOO DARK	ELD
1/03/2018	PM10SM002	686.791	TOO DARK	ELD
3/03/2018	PM10SM003	584.462	292	6,0382
7/03/2018	PM10SM004	344.031	242	5,1995
9/03/2018	PM10SM005	310.682	236	4,8266
11/03/2018	PM10SM006	215.595	85	1,7692
19/03/2018	PM10SM009	405.026	179	3,7876
29/03/2018	PM10SM014	203.959	148	2,9608
22/04/2018	PM10SM024	251.917	192.6	3,9125
24/04/2018	PM10SM025	439.419	TOO DARK	ELD
26/04/2018	PM10SM026	294.758	243.3	4,8982
20/05/2018	PM10SM028	373.782	273	5,5290

Fuente: Autores.

ANEXO B. Tablas del resultado de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico en los sectores la Salle PM10 y PM2.5, Bomberos y Movilidad PM10.

Tabla 1. Resultados de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico sector la Salle PM10.

Date	Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC/OC
27/02/2018	PM10CS001	5.3656	6.2405	11.0261	0.5660
01/03/2018	PM10CS002	3.3996	2.6703	8.9821	0.2973
03/03/2018	PM10CS003	2.1246	1.3140	7.2004	0.1825
07/03/2018	PM10CS004	1.3813	1.3026	4.3089	0.3023
09/03/2018	PM10CS005	1.8903	1.1744	4.0296	0.2914
11/03/2018	PM10CS006	1.4745	1.3366	4.0741	0.3281
23/03/2018	PM10CS011	4.2355	2.9101	11.2874	0.2578
29/03/2018	PM10CS014	0.6983	0.3175	2.1396	0.1484
02/05/2018	PM10CS028	1.4056	0.8671	2.6328	0.3293

Fuente: Autores.

Tabla 2. Resultados de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico sector la Salle PM2.5

Date	Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC/OC
27/02/2018	PM2.5CS001	4.7474	3.5378	9.5079	0.3721
01/03/2018	PM2.5CS002	2.8225	2.2572	6.3510	0.3554
03/03/2018	PM2.5CS003	2.2143	1.5847	7.3064	0.2169
07/03/2018	PM2.5CS004	1.4639	1.0576	2.8785	0.3674
09/03/2018	PM2.5CS005	1.9692	1.4264	3.7410	0.3813
11/03/2018	PM2.5CS006	1.4872	0.9205	3.9288	0.2343
23/03/2018	PM2.5CS011	4.4117	3.1116	11.3461	0.2742
29/03/2018	PM2.5CS014	0.8440	0.4837	1.9881	0.2433
02/05/2018	PM2.5CS028	1.4836	0.9075	2.1220	0.4277

Fuente: Autores.

Tabla 3. Resultados de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico sector Bomberos PM10.

Date	Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC/OC
03/03/2018	PM10BF003	6.2543	4.8886	14.8513	0.3292
07/03/2018	PM10BF004	5.0913	5.1809	10.6263	0.4876
09/03/2018	PM10BF005	5.4298	7.5663	11.1743	0.6771
11/03/2018	PM10BF006	3.4401	2.7220	7.8239	0.3479
02/05/2018	PM10BF028	5.7449	5.7935	10.7087	0.5410

Fuente: Autores.

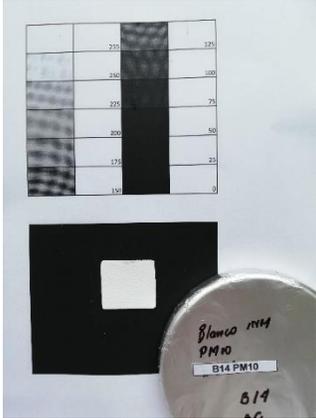
Tabla 4. Resultados de las técnicas de medición óptico y térmico/óptico sector Movilidad PM10.

Date	Código	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	OC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	EC/OC
03/03/2018	PM10SM003	6.0382	4.9396	14.5922	0.3385
07/03/2018	PM10SM004	5.1995	6.4128	9.7368	0.6586
09/03/2018	PM10SM005	4.8266	5.1434	9.7301	0.5286
11/03/2018	PM10SM006	1.7692	1.2059	4.8994	0.2461
29/03/2018	PM10SM014	2.9608	2.1586	5.5957	0.3858
20/05/2018	PM10SM028	5.5290	6.3709	11.7669	0.5414

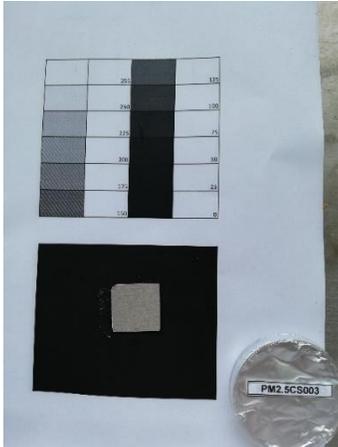
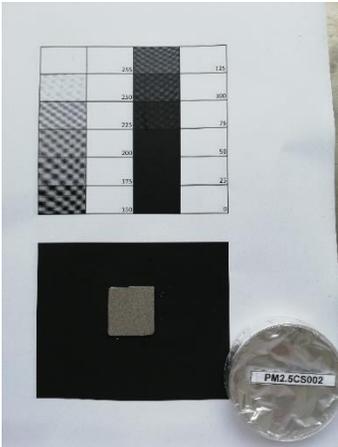
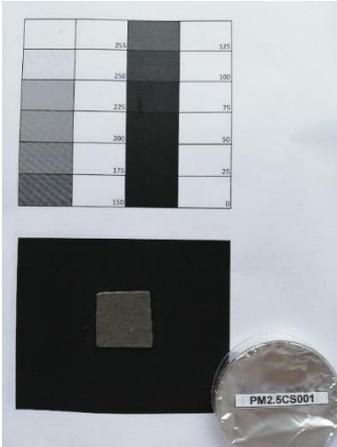
Fuente: Autores.

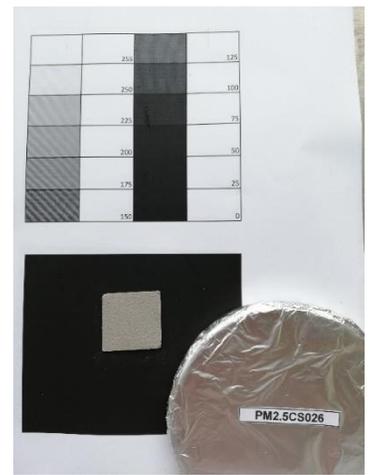
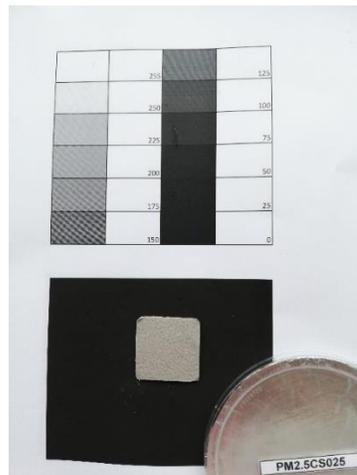
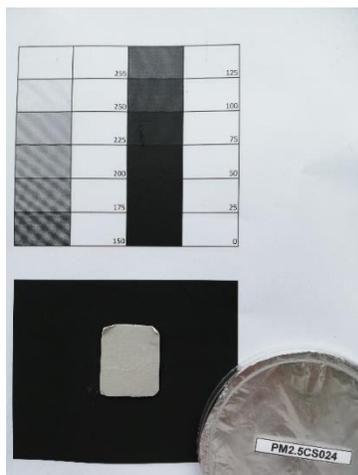
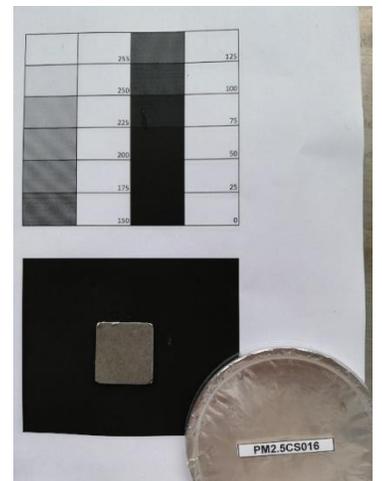
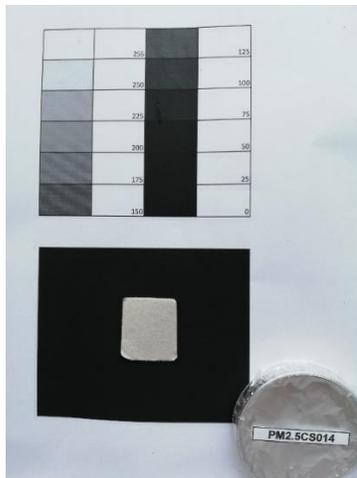
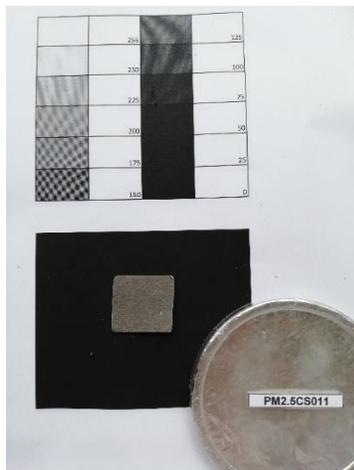
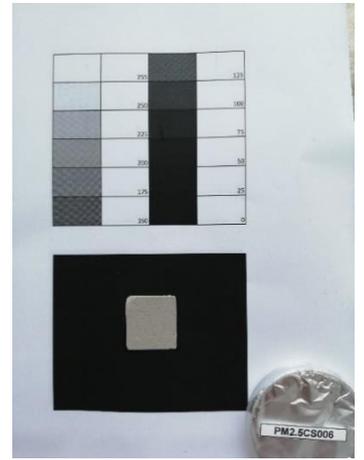
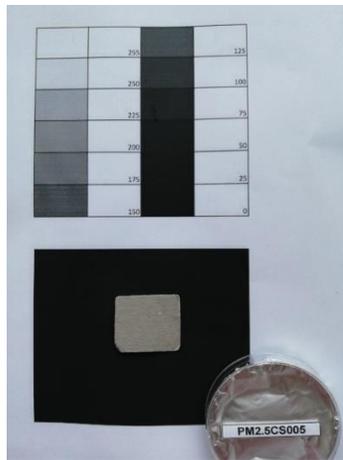
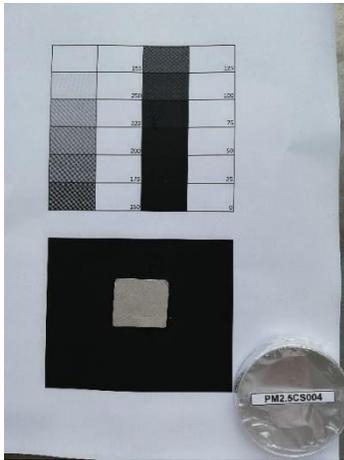
ANEXO C. Fotos del método fotográfico.

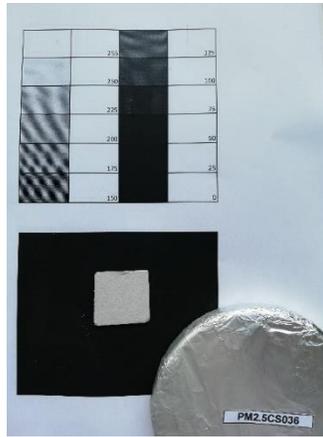
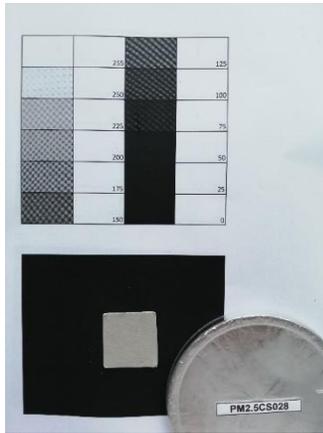
Blanco.



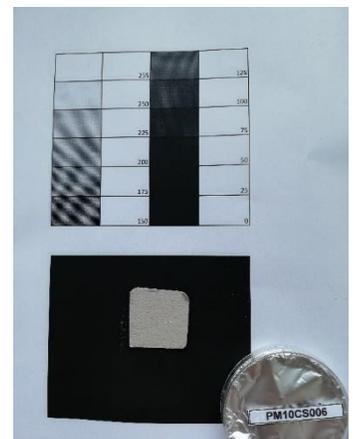
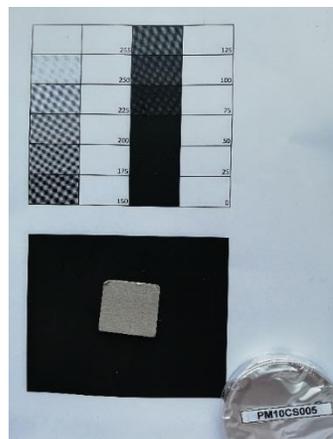
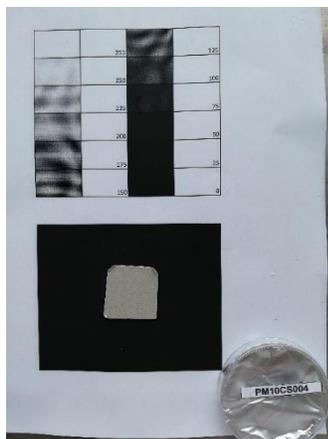
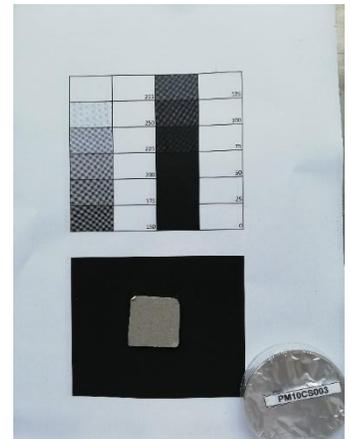
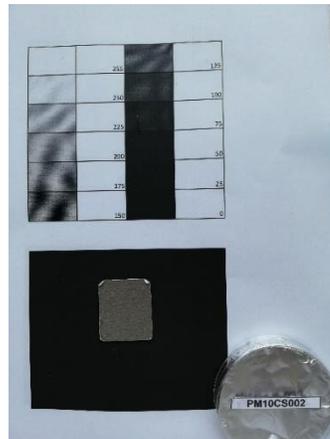
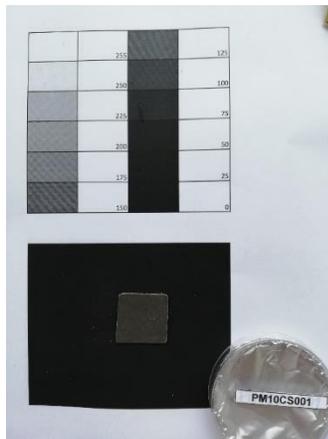
Colegio la Salle PM 2.5

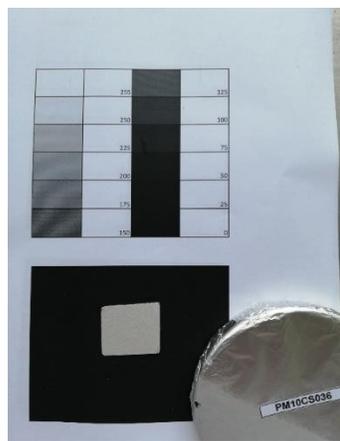
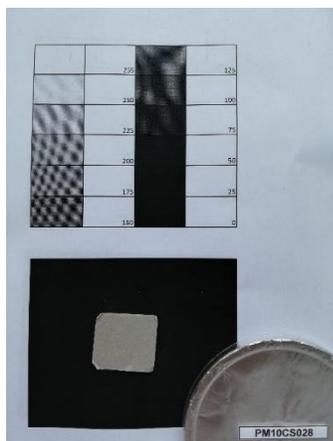
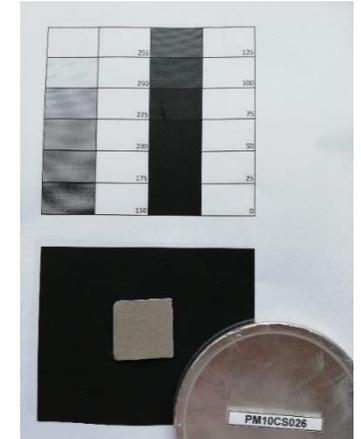
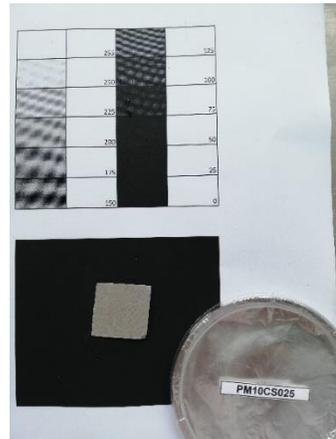
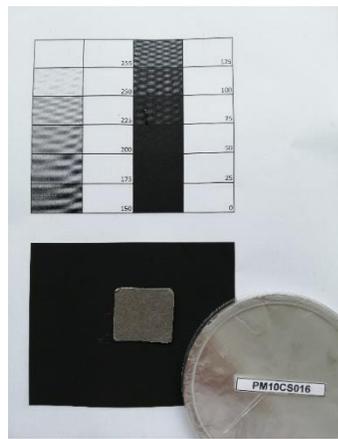
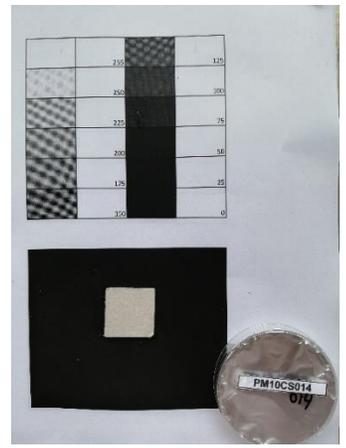
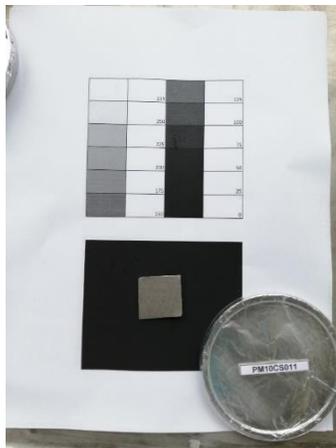
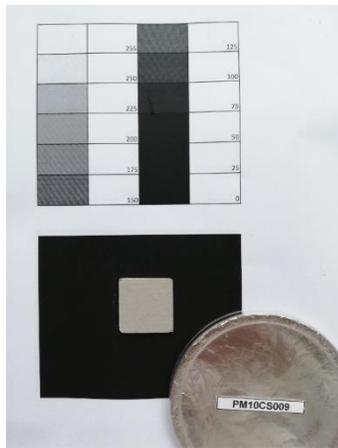




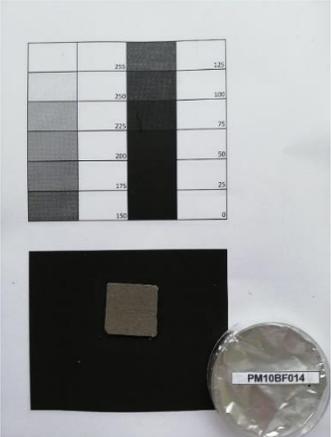
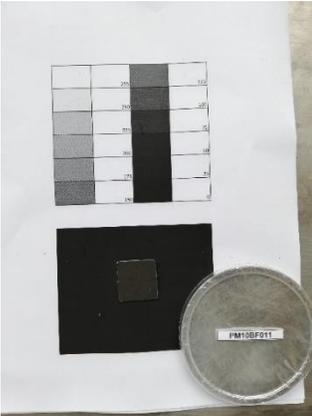
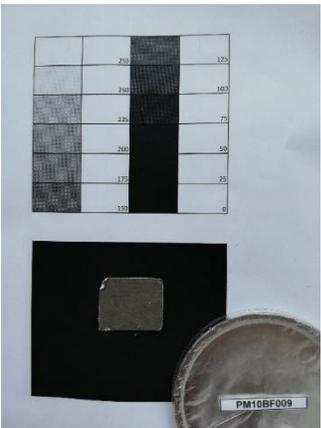
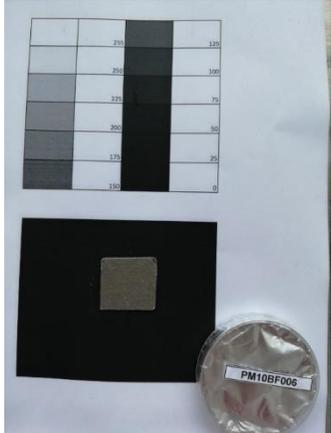
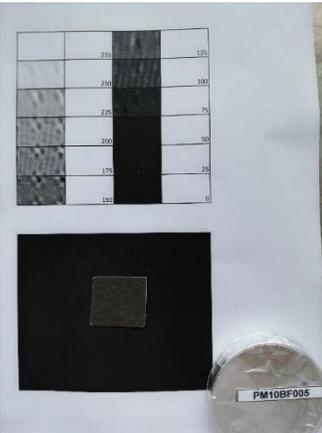
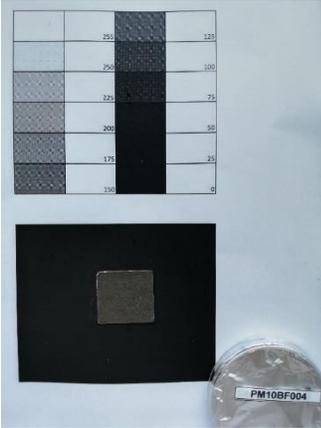
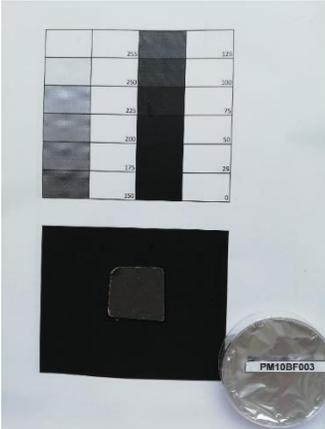
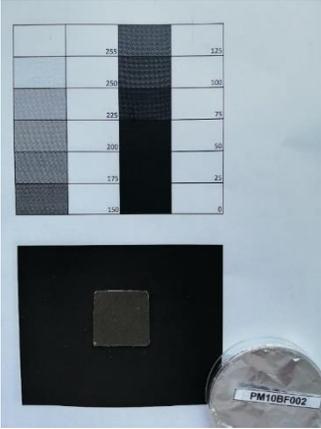
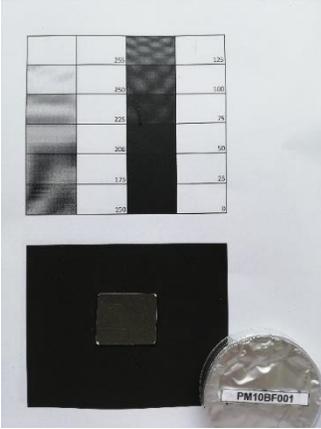


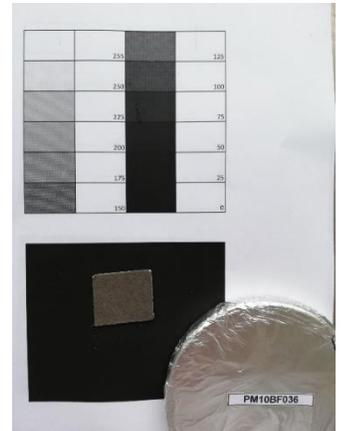
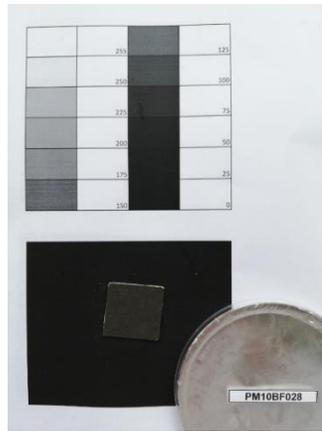
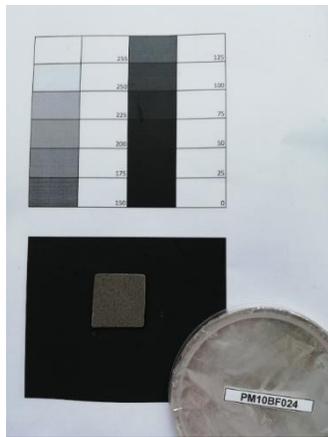
Colegio la Salle PM 10



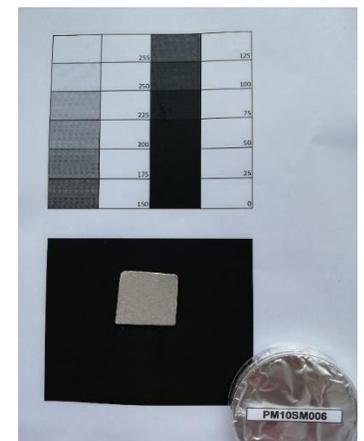
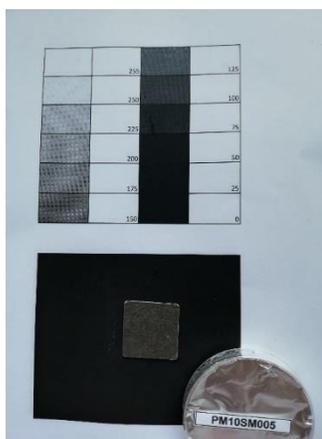
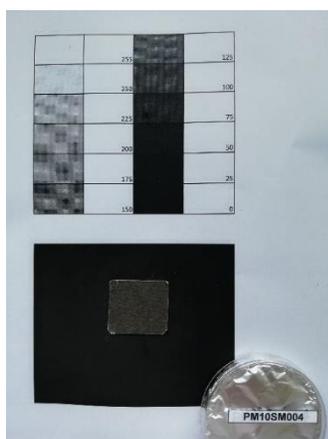
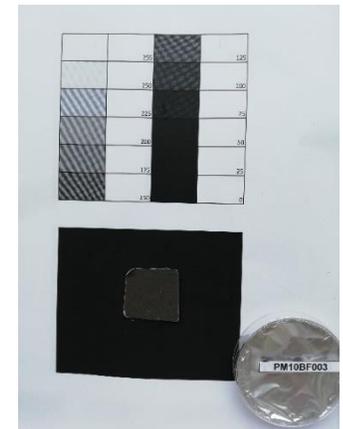
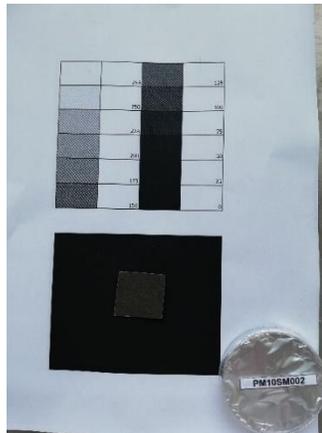
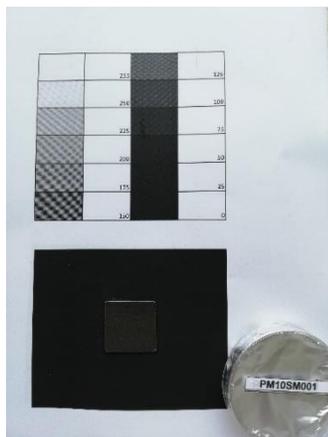


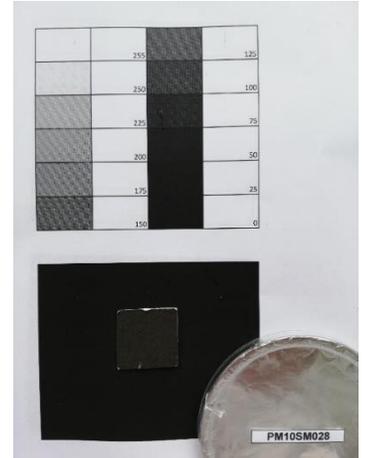
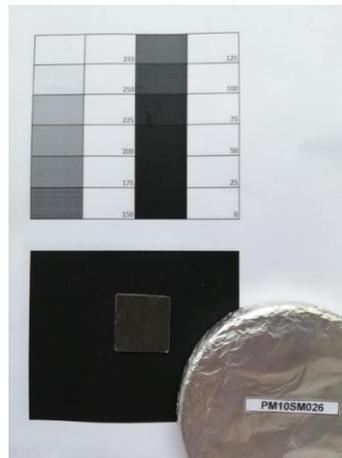
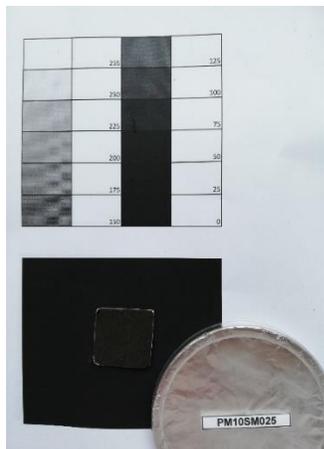
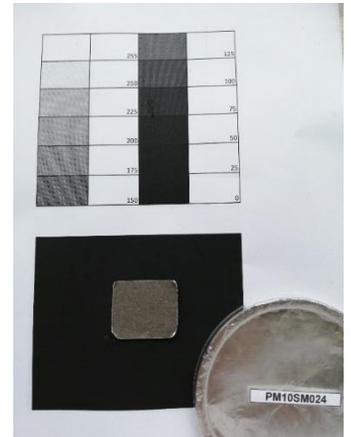
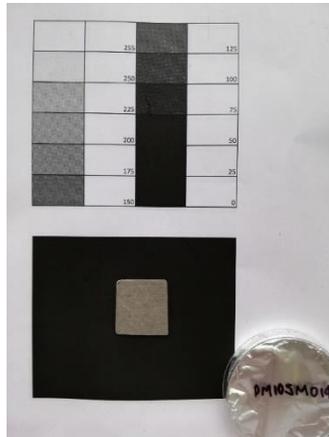
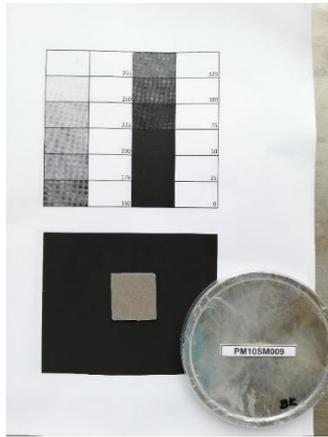
Sector Bomberos PM 10





Sector Movilidad PM10





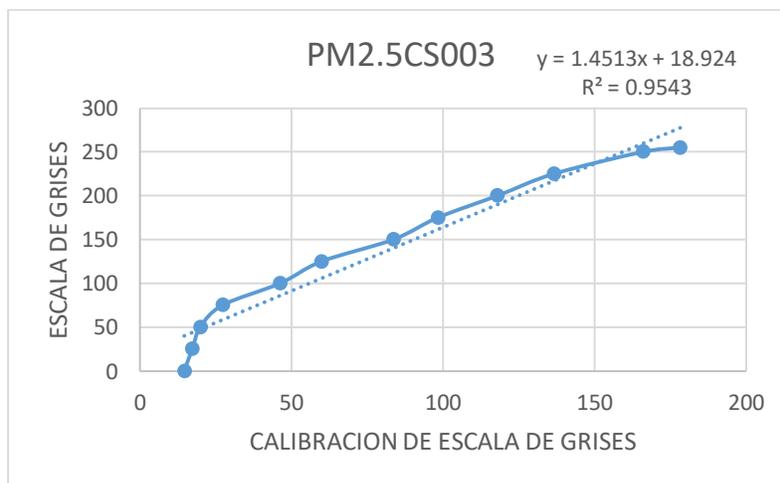
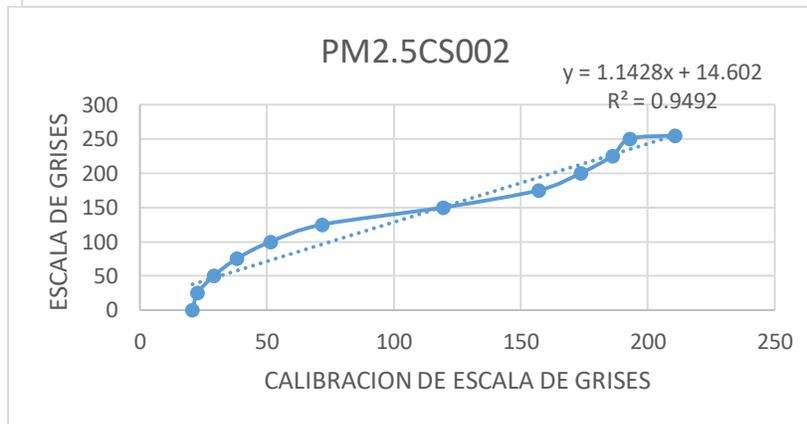
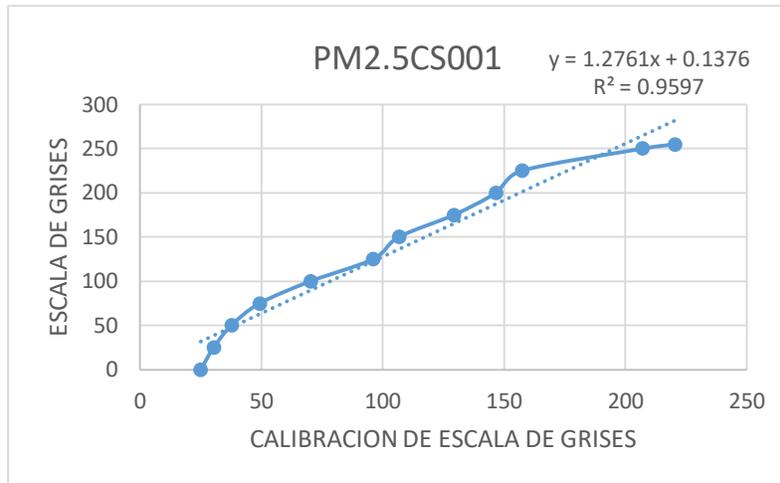
ANEXO D. Reporte de datos del método fotográfico.

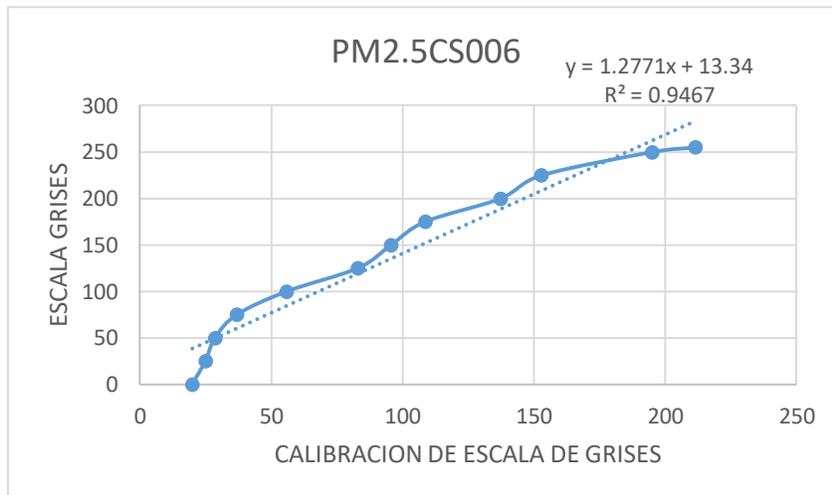
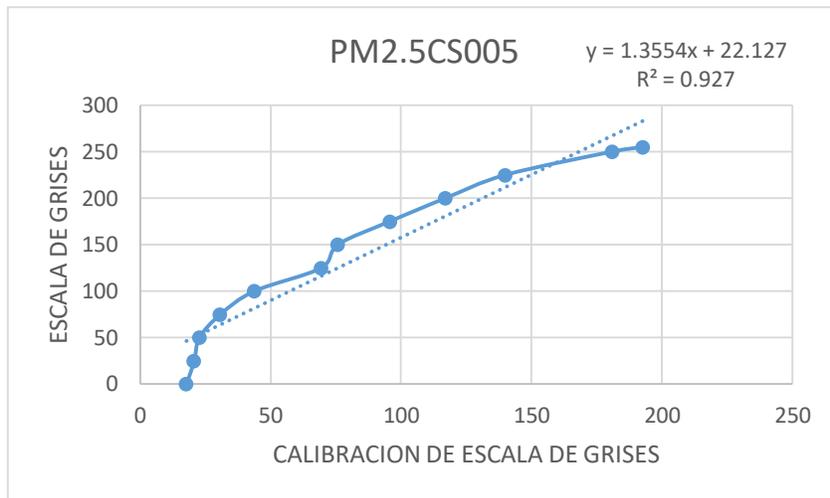
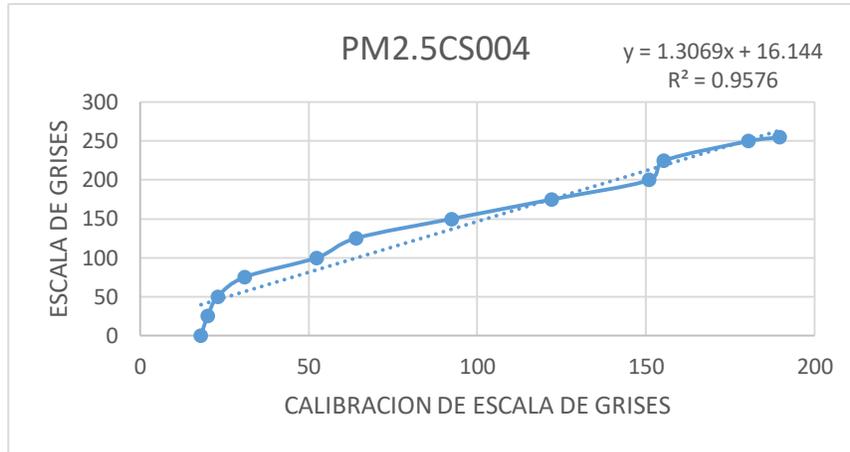
La Salle PM2.5

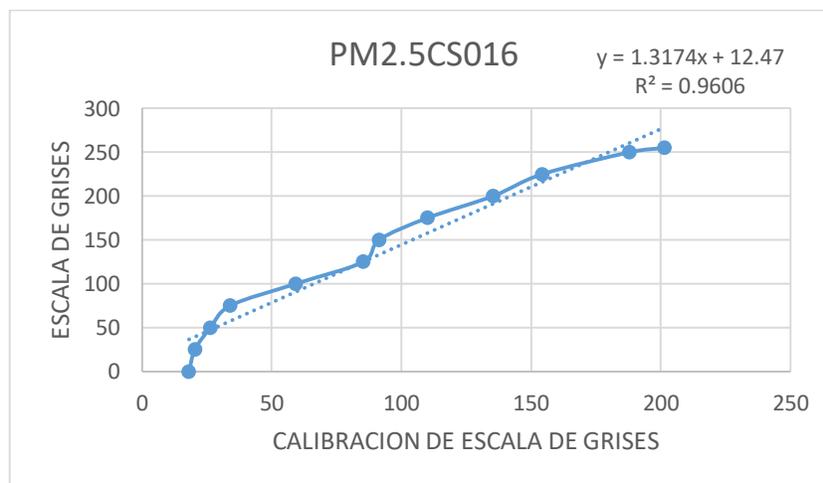
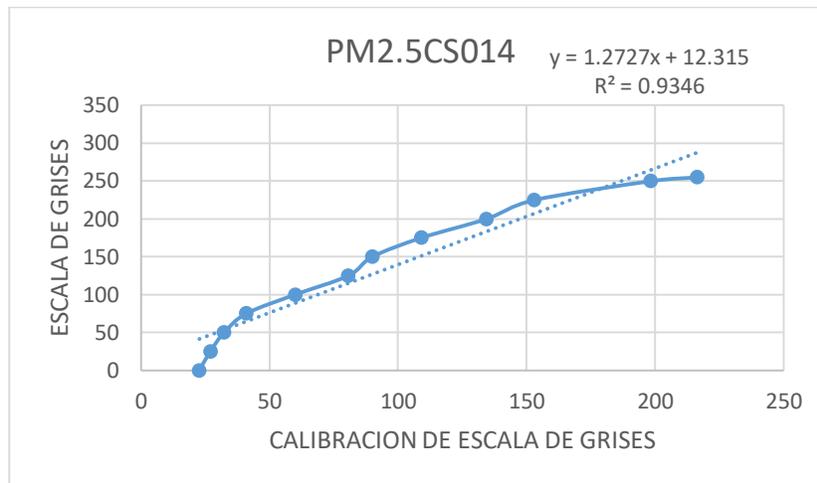
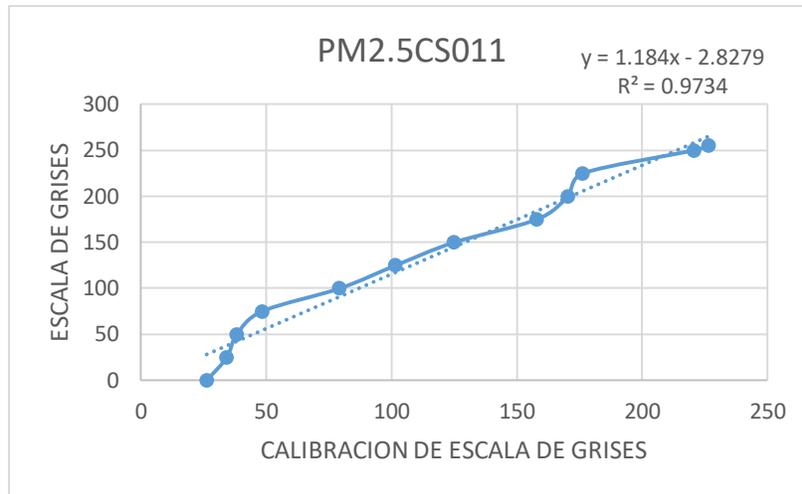
Estación	Fecha	Código	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	Valor experimental
Salle	27/02/2018	PM2.5CS001	63	62	60	61,67
Salle	1/03/2018	PM2.5CS002	81	78	97	85,33
Salle	3/03/2018	PM2.5CS003	89	83	99	90,33
Salle	7/03/2018	PM2.5CS004	107	99	84	96,67
Salle	9/03/2018	PM2.5CS005	117	114	111	114
Salle	11/03/2018	PM2.5CS006	138	130	115	127,67
Salle	23/03/2018	PM2.5CS011	77	70	78	75
Salle	29/03/2018	PM2.5CS014	181	163	146	163,33
Salle	4/04/2018	PM2.5CS016	90	90	81	87
Salle	22/04/2018	PM2.5CS024	157	161	169	162,33
Salle	24/04/2018	PM2.5CS025	121	103	112	112
Salle	26/04/2018	PM2.5CS026	120	109	92	107
Salle	2/05/2018	PM2.5CS028	130	140	137	135,67
Salle	20/05/2018	PM2.5CS036	136	126	142	134,67

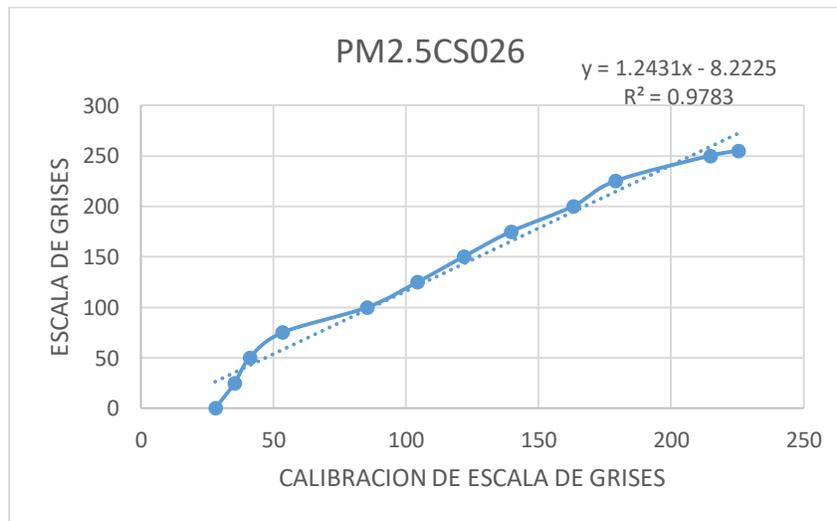
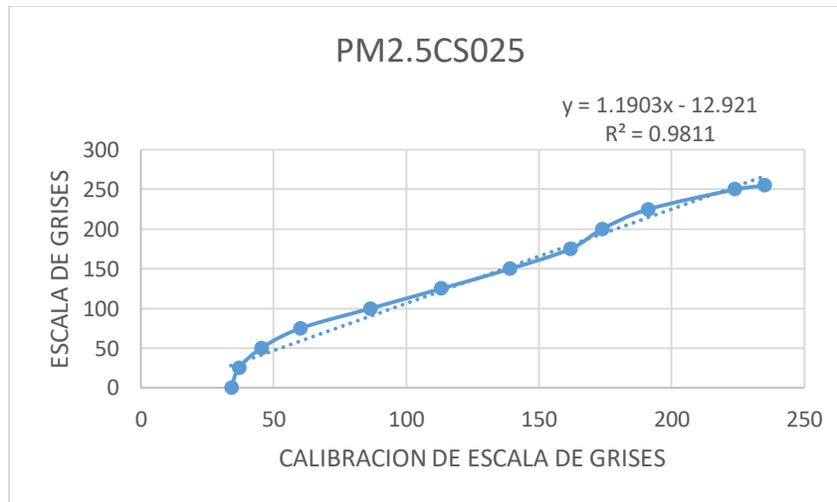
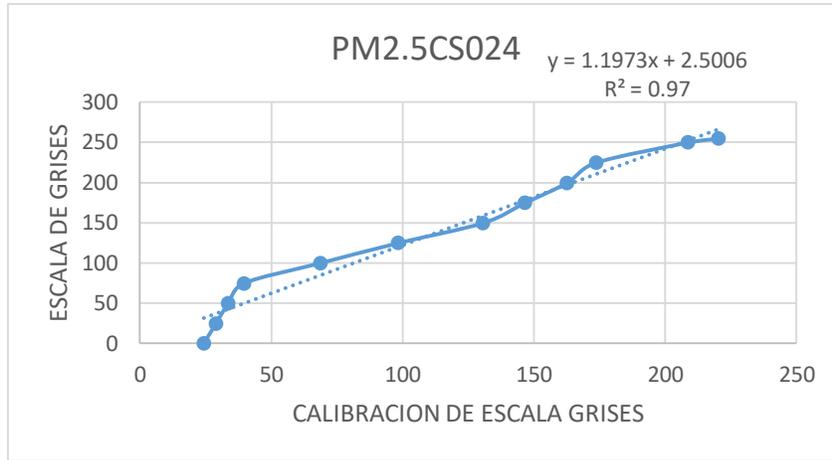
ESCALA DE BANDA DE GRISES											
0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	255
25,00	30,33	37,67	49,33	70,33	96,00	106,67	129,33	146,67	157,33	207,00	220,33
20,67	22,67	29,00	38,00	51,33	71,67	119,33	157,00	173,67	186,00	193,00	210,67
14,67	17,33	20,00	27,33	46,33	60,00	83,67	98,33	118,00	136,67	166,00	178,33
18,00	20,00	23,00	31,00	52,33	64,00	92,33	122,00	151,00	155,33	180,33	189,67
17,67	20,67	22,67	30,67	43,67	69,33	75,67	95,67	117,00	140,00	181,00	192,67
20,00	25,00	28,67	37,00	56,00	83,00	95,67	108,67	137,33	153,00	195,00	211,67
26,33	34,33	38,33	48,33	79,33	101,67	125,00	158,00	170,33	176,33	220,67	226,67
22,67	27,00	32,33	41,00	60,00	80,67	90,00	109,00	134,33	153,00	198,33	216,33
18,00	20,33	26,33	34,00	59,33	85,33	91,33	110,00	135,33	154,33	188,00	201,33
24,33	29,00	33,67	39,67	68,67	98,33	130,67	146,67	162,67	173,67	208,67	220,33
34,00	37,00	45,33	60,00	86,33	113,00	139,00	161,67	173,67	191,00	223,67	235,00
28,00	35,33	41,00	53,33	85,33	104,33	121,67	139,67	163,00	179,00	214,67	225,33
19,00	21,67	24,33	36,00	75,00	109,33	128,67	150,33	171,00	182,33	201,00	212,00
13,33	16,67	20,67	31,33	55,67	79,00	119,33	147,00	157,67	176,33	186,33	195,33

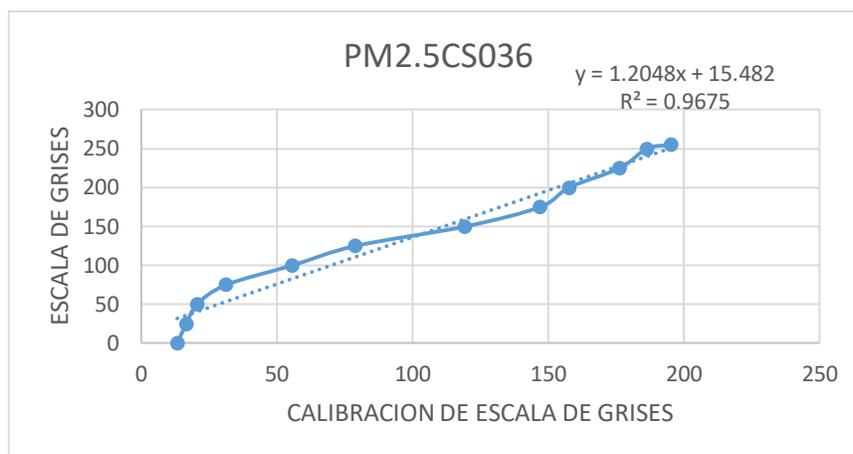
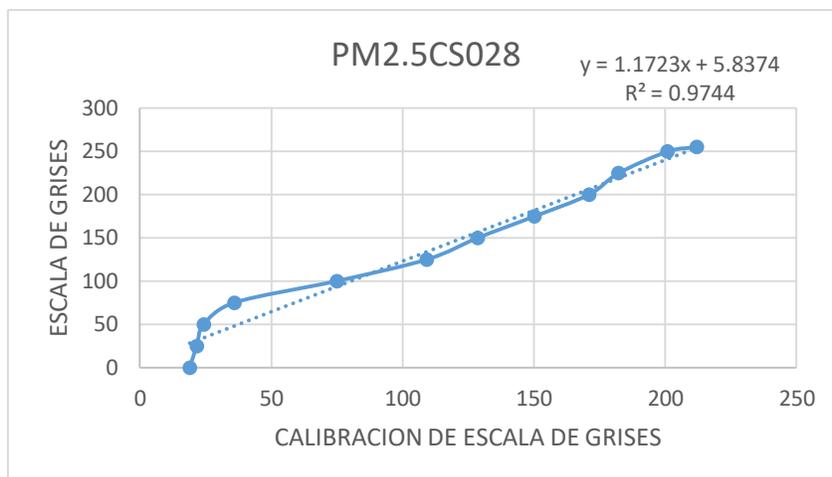
Graficas de regresión lineal para el método fotográfico.











Método fotográfico			
Código	Valor Experimental	Ecuación	Valor fotos
PM2.5CS001	61,67	$y = 1.2761x + 0.1376$	78,83
PM2.5CS002	85,33	$y = 1.1428x + 14.602$	112,12
PM2.5CS003	90,33	$y = 1.4513x + 18.924$	150,02
PM2.5CS004	96,67	$y = 1.3069x + 16.144$	142,48
PM2.5CS005	114,00	$y = 1.3554x + 22.127$	176,64
PM2.5CS006	127,67	$y = 1.2771x + 13.34$	176,38
PM2.5CS011	75,00	$y = 1.184x - 2.8279$	85,97
PM2.5CS014	163,33	$y = 1.2727x + 12.315$	220,19
PM2.5CS016	87,00	$y = 1.3174x + 12.47$	127,08
PM2.5CS024	162,33	$y = 1.1973x + 2.5006$	196,86
PM2.5CS025	112,00	$y = 1.1903x - 12.921$	120,39
PM2.5CS026	107,00	$y = 1.2431x - 8.2225$	124,79

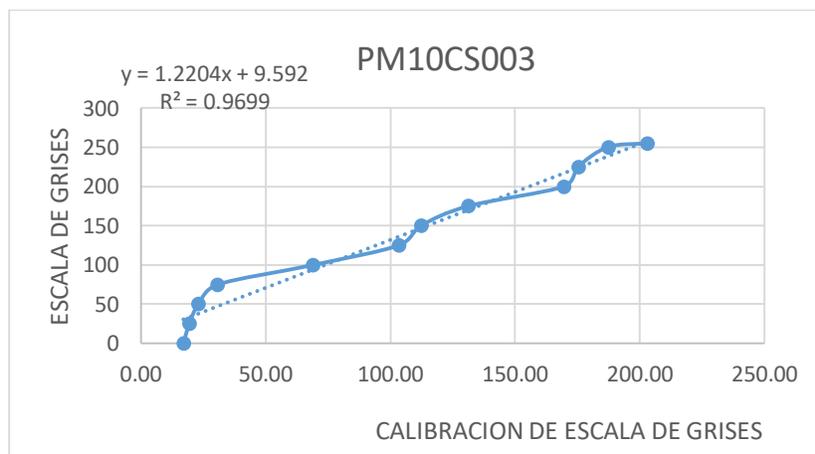
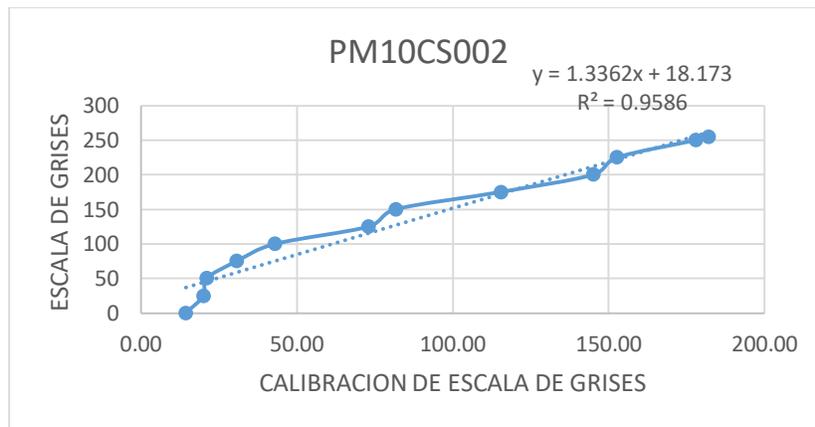
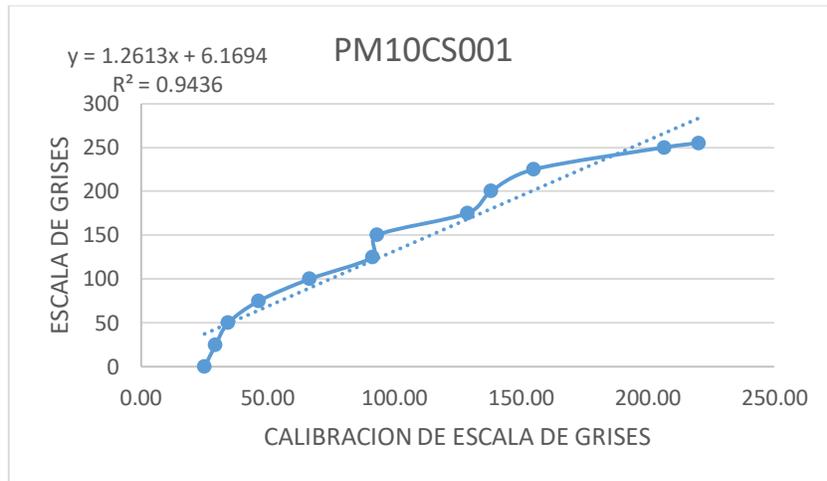
PM2.5CS028	135,67	$y = 1.1723x + 5.8374$	164,88
PM2.5CS036	134,67	$y = 1.2048x + 15.482$	177,73

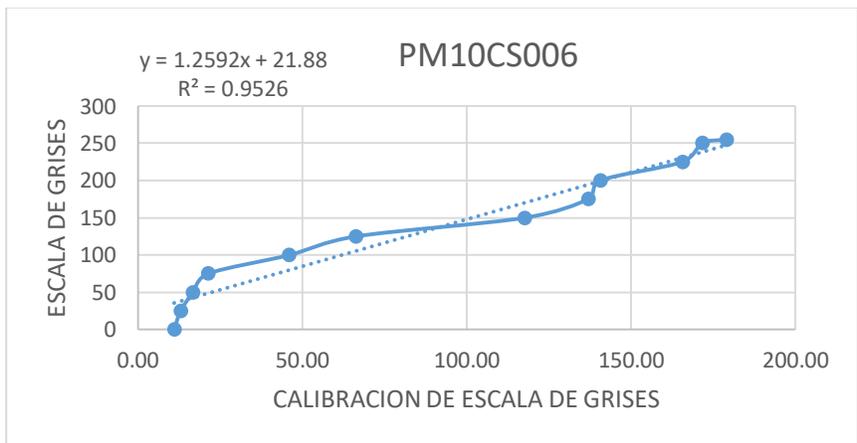
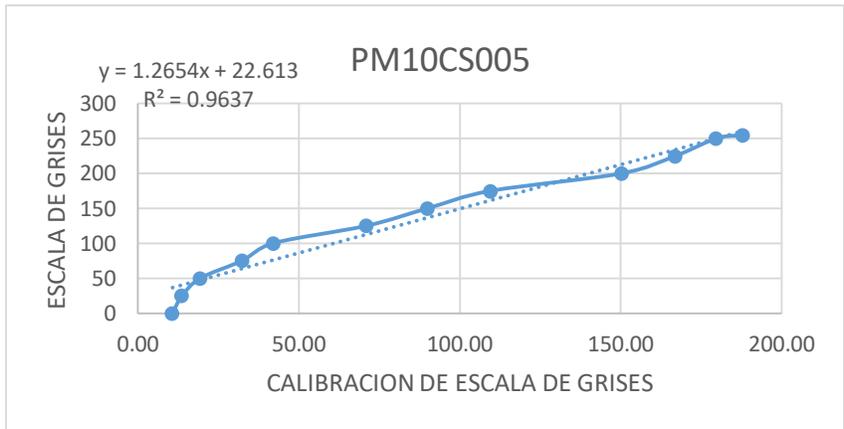
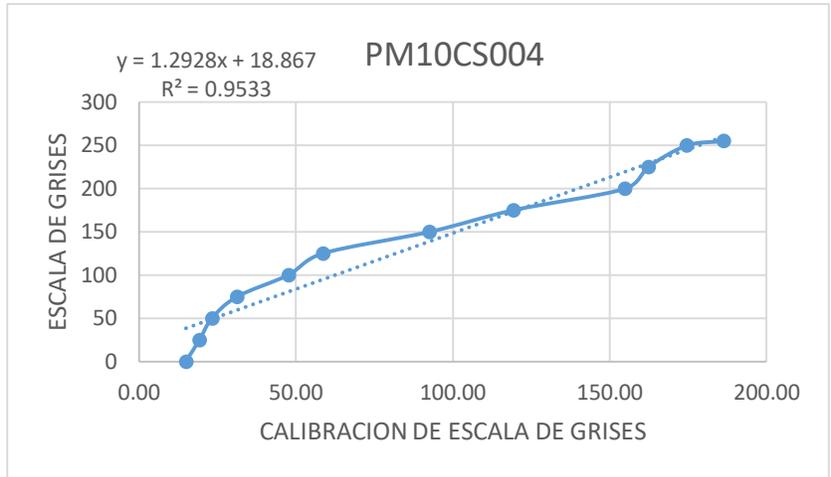
La Salle PM10

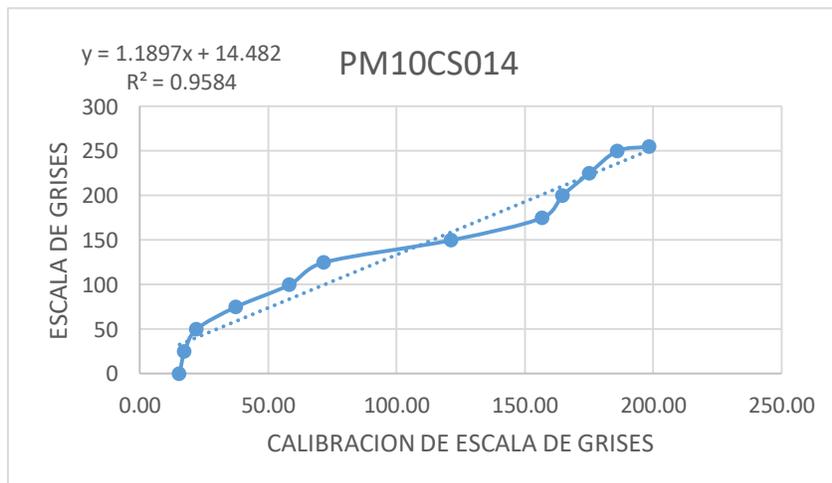
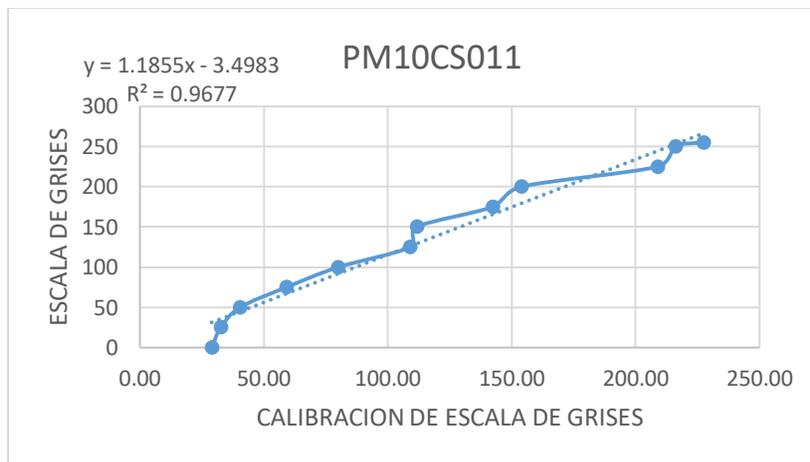
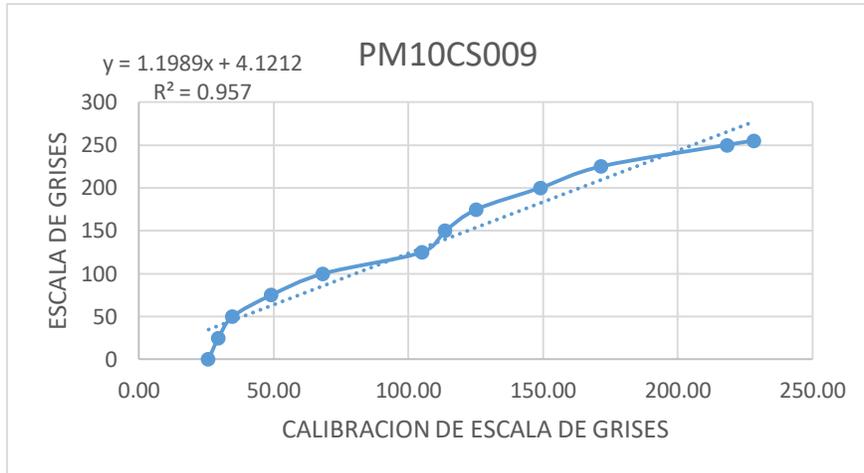
Estación	Fecha	Código	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	valor experimental
Salle	27/02/2018	PM10CS001	48	47	55	50
Salle	1/03/2018	PM10CS002	59	61	73	64,33
Salle	3/03/2018	PM10CS003	115	117	115	115,67
Salle	7/03/2018	PM10CS004	133	127	133	131
Salle	9/03/2018	PM10CS005	130	124	126	126,67
Salle	11/03/2018	PM10CS006	158	165	162	161,67
Salle	19/03/2018	PM10CS009	168	169	165	167,33
Salle	23/03/2018	PM10CS011	105	98	114	105,67
Salle	29/03/2018	PM10CS014	175	170	183	176
Salle	4/04/2018	PM10CS016	82	85	80	82,33
Salle	24/04/2018	PM10CS025	130	129	144	134,33
Salle	26/04/2018	PM10CS026	129	123	137	129,67
Salle	2/05/2018	PM10CS028	126	127	128	127
Salle	20/05/2018	PM10CS036	150	146	146	147,33

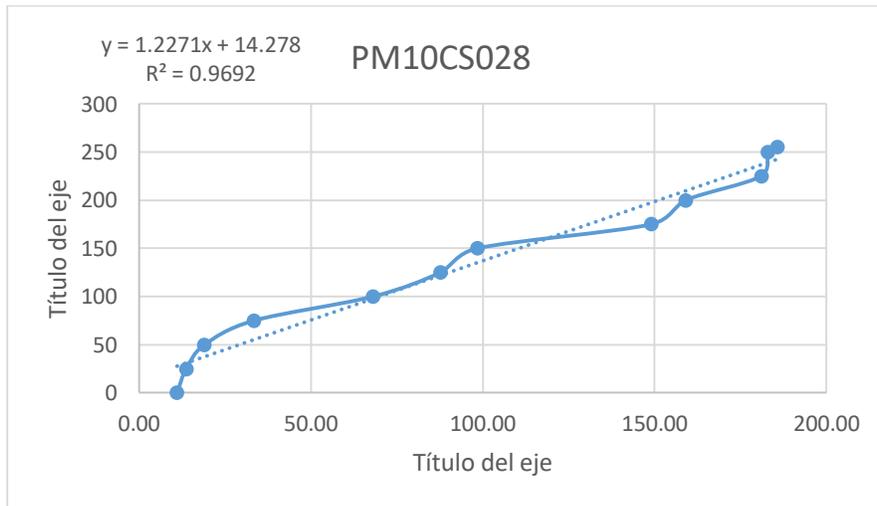
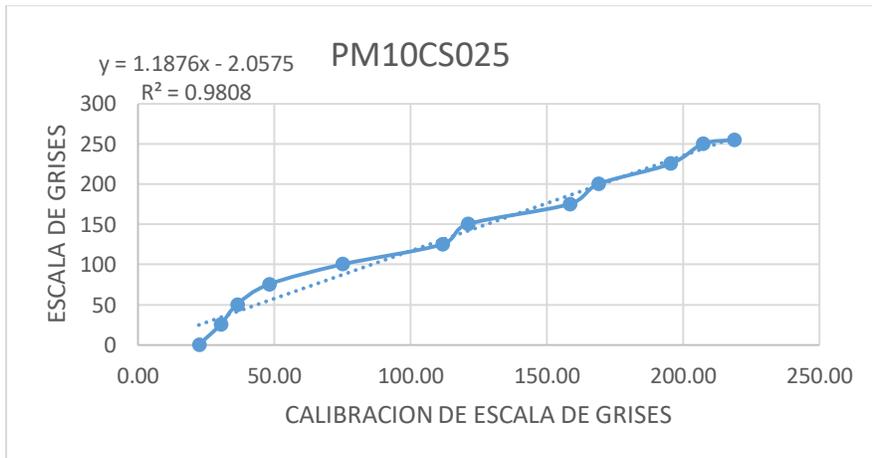
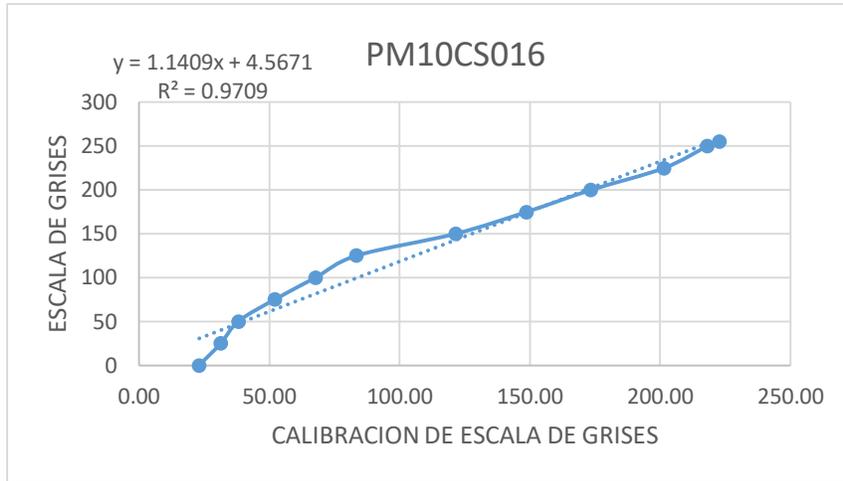
ESCALA DE BANDA DE GRISES											
0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	255
25	29,33	34,33	46,33	66,33	91,33	93	128,67	138	155	206,33	220
14,33	20	21	30,67	43	73	81,67	115,33	145	152,67	178	182
17	19,33	23	30,67	69	103,3	112,33	131,33	169,67	175,33	187,33	203
15	19,33	23,33	31,33	47,67	58,67	92,67	119,33	155	162,33	174,67	186,33
10,67	13,67	19,33	32,33	42	71	90	109,67	150,33	167	179,67	188
11	13	16,67	21,33	46	66,33	117,67	137	140,67	165,67	171,67	179
25,67	29,33	34,67	49	68,33	105	113,67	125,33	149	171,67	218,33	228,33
29	32,67	40,33	59	80	109	111,67	142,33	154	209	216	227,33
15,33	17,33	22	37,33	58,33	71,67	121,33	156,67	164,67	175	186	198,33
23	31,33	38	52	67,67	83,33	121,33	148,67	173,33	201,33	218	222,67
22,33	30,33	36,33	48	75	111,7	121	158,33	169	195,33	207,33	218,67
23	28,33	32,33	46,33	74,67	100,7	113	133	152,67	167,33	208	216,67
11	13,67	19	33,33	68	87,67	98,33	149	159	181	183	185,67
15,67	19,67	24	30	49	70,33	86	111	121,33	138	169,33	183,67

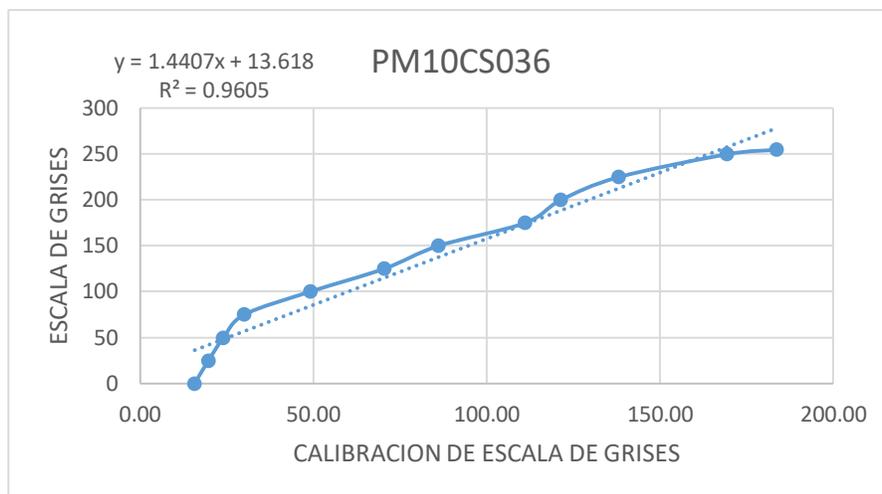
Graficas de regresión lineal para el método fotográfico.











Método fotográfico			
Código	Valor Experimental	Ecuación	Valor fotos
PM10CS001	50,00	$y = 1,2613x + 6,1694$	69,23
PM10CS002	64,33	$y = 1,3362x + 18,173$	104,14
PM10CS003	115,67	$y = 1,2204x + 9,592$	150,75
PM10CS004	131,00	$y = 1,2928x + 18,867$	188,22
PM10CS005	126,67	$y = 1,2654x + 22,613$	182,90
PM10CS006	161,67	$y = 1,2592x + 21,88$	225,45
PM10CS009	167,33	$y = 1,1989x + 4,1212$	204,74
PM10CS011	105,67	$y = 1,1855x - 3,4983$	121,77
PM10CS014	176,00	$y = 1,1897x + 14,482$	223,87
PM10CS016	82,33	$y = 1,1409x + 4,5671$	98,50
PM10CS025	134,33	$y = 1,1876x - 2,0575$	157,48
PM10CS026	129,67	$y = 1,2532x + 0,4824$	162,98
PM10CS028	127,00	$y = 1,2271x + 14,278$	170,12
PM10CS036	147,33	$y = 1,4407x + 13,618$	225,88

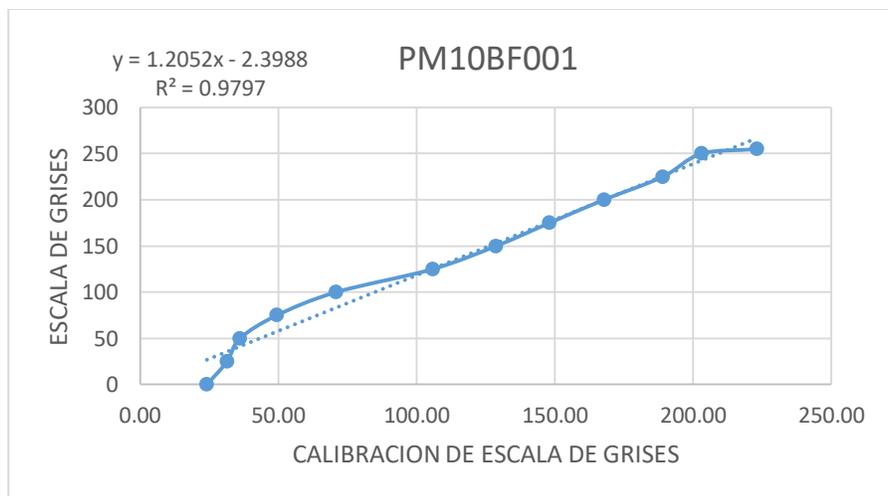
Sector Bomberos PM10

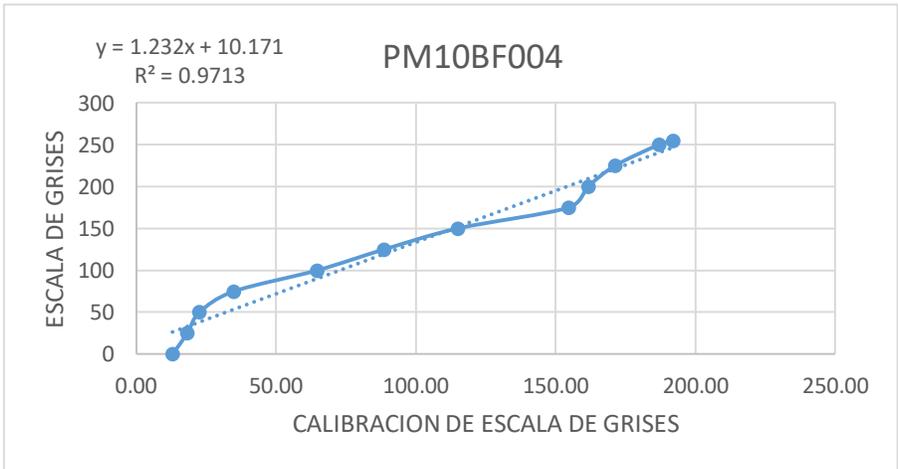
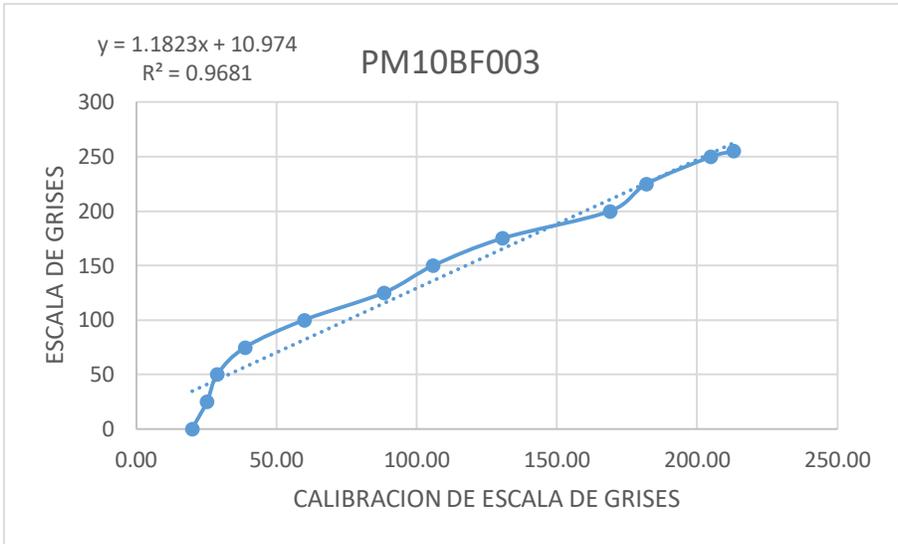
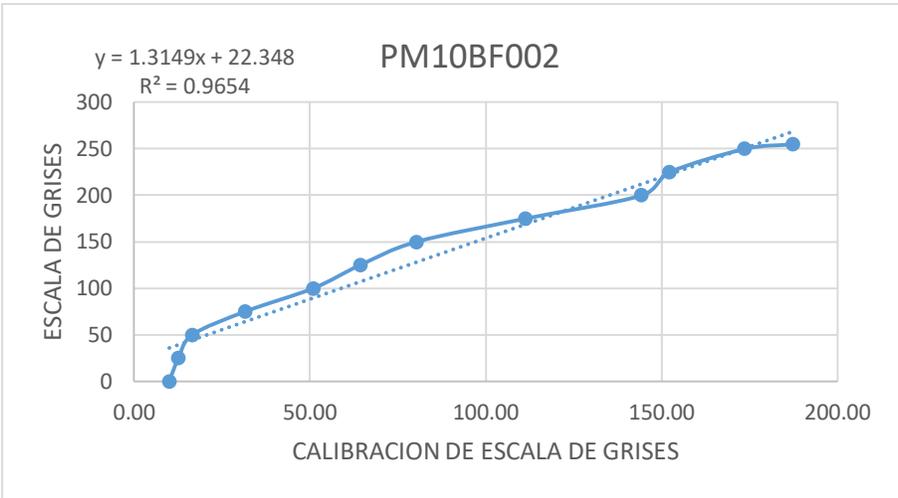
Estación	Fecha	Código	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	Valor experimental
Bomberos	27/02/2018	PM10BF001	32	40	35	35,67
Bomberos	1/03/2018	PM10BF002	38	42	25	35
Bomberos	3/03/2018	PM10BF003	38	33	34	35
Bomberos	7/03/2018	PM10BF004	83	67	69	73
Bomberos	9/03/2018	PM10BF005	25	29	34	29,33

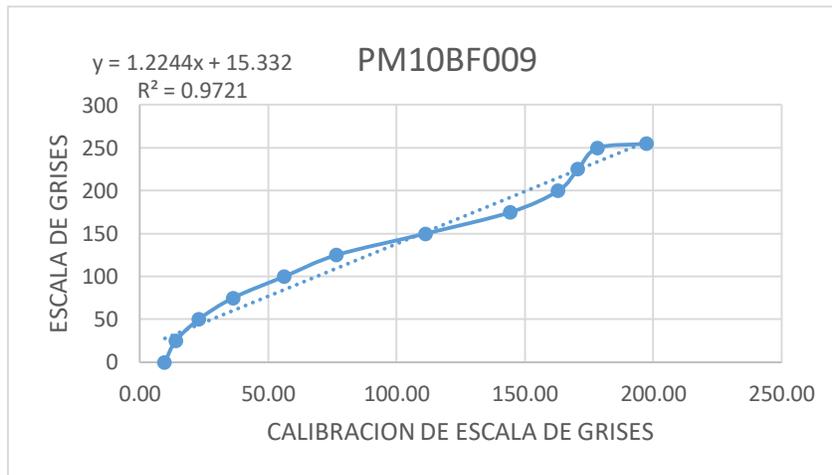
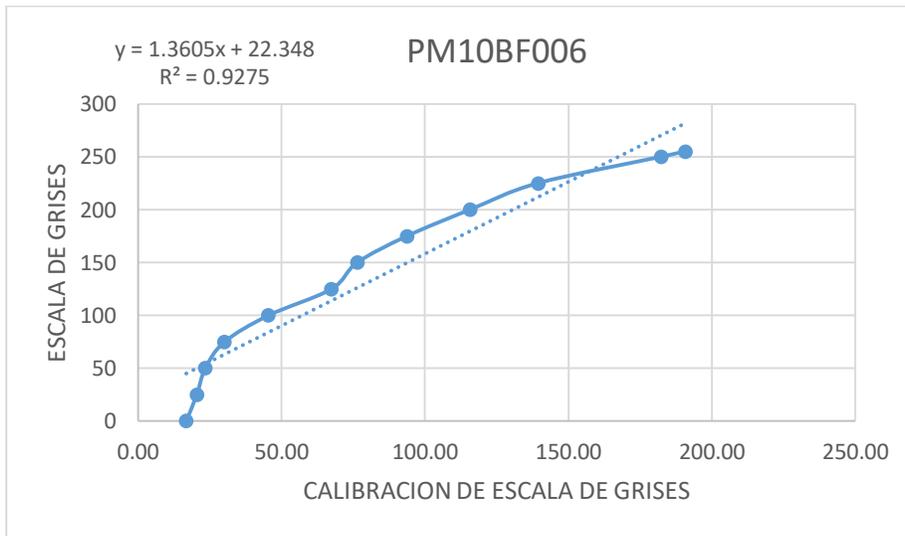
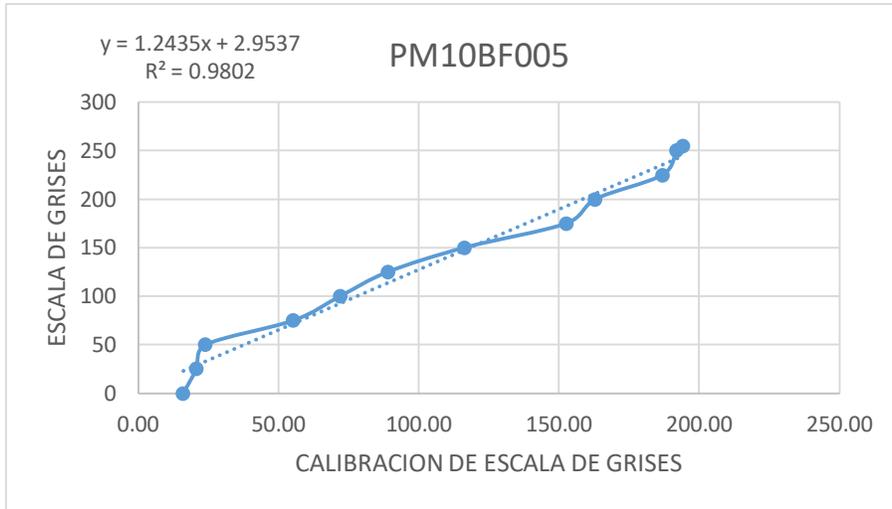
Bomberos	11/03/2018	PM10BF006	67	70	68	68,33
Bomberos	19/03/2018	PM10BF009	70	81	43	64,67
Bomberos	23/03/2018	PM10BF011	29	29	37	31,67
Bomberos	29/03/2018	PM10BF014	76	61	68	68,33
Bomberos	22/04/2018	PM10BF024	53	49	44	48,67
Bomberos	2/05/2018	PM10BF028	41	42	46	43
Bomberos	20/05/2018	PM10BF036	54	45	58	52,33

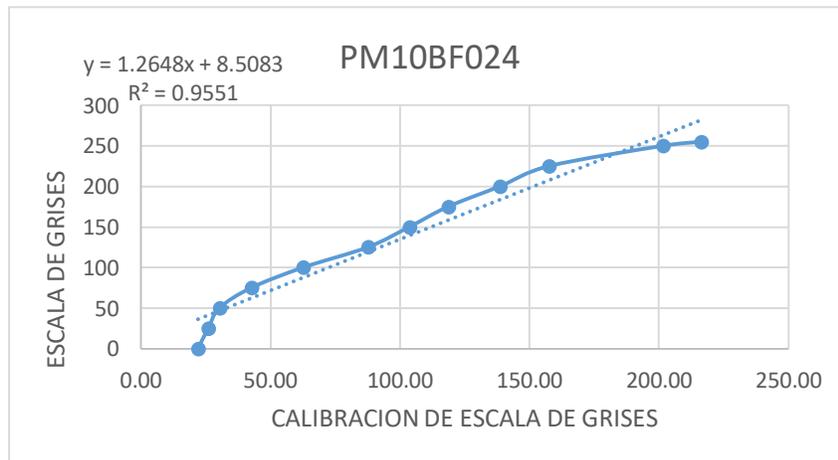
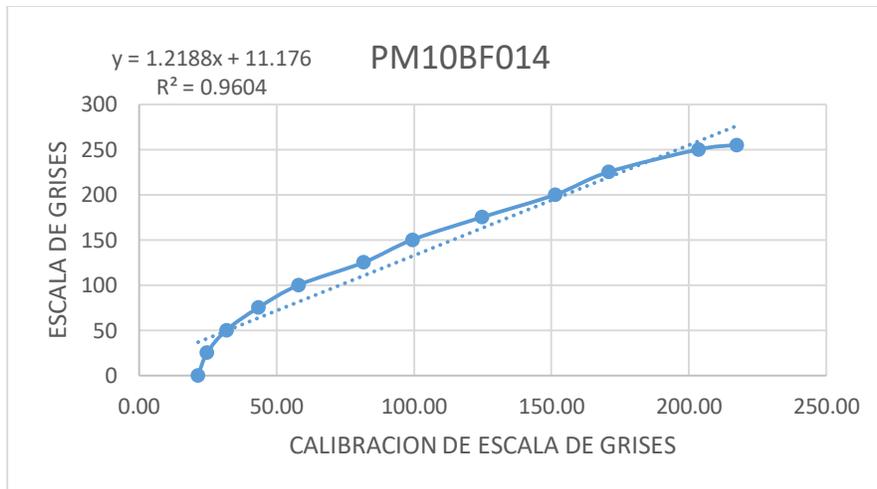
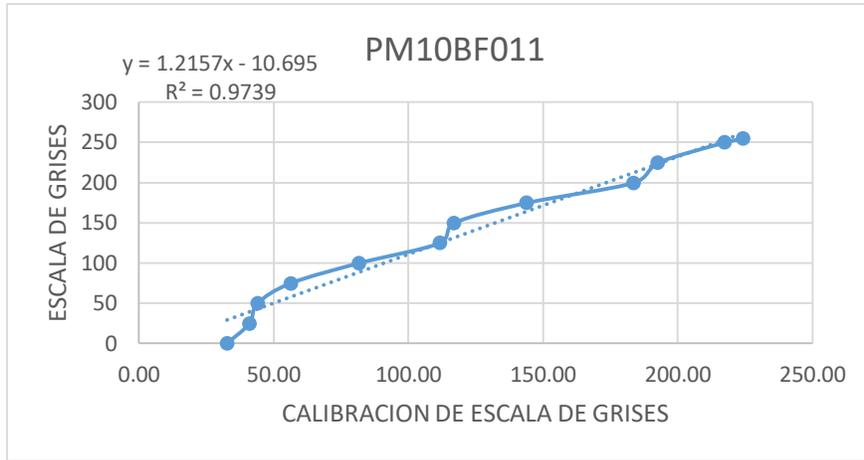
ESCALA DE BANDA DE GRISES											
0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	255
24	31,33	36	49,33	70,67	105,67	128,67	148	167,67	189	203	223
10	12,67	16,67	31,67	51	64,33	80,33	111,33	144,33	152,33	173,67	187,33
20	25,33	29	39	60	88,33	106	130,67	169	182	205	213
13	18,33	22,67	35	64,67	88,67	115	154,67	161,67	171,33	187	192
16	20,67	24	55,33	72	89	116,33	152,67	163	187	192	194,33
16,67	20,33	23,33	30	45,33	67,33	76,33	93,67	115,67	139,33	182,33	190,67
9,67	14	23	36,33	56,33	76,67	111,33	144,33	163	170,67	178,33	197,33
32,67	41	44	56,33	81,67	111,67	117	144	183,67	192,67	217,33	224,33
21,33	24,67	31,67	43,33	58	81,67	99,33	124,67	151,33	170,67	203,33	217,33
22	26	30,33	42,67	62,67	87,67	103,67	118,67	138,67	157,67	201,67	216,33
29	33,67	40,67	54,33	78,67	105	109	146,33	162,33	177,33	218,67	228,67
24,33	29	33,67	48,67	70	88,67	135,67	163,33	170,33	182,67	209,67	221,67

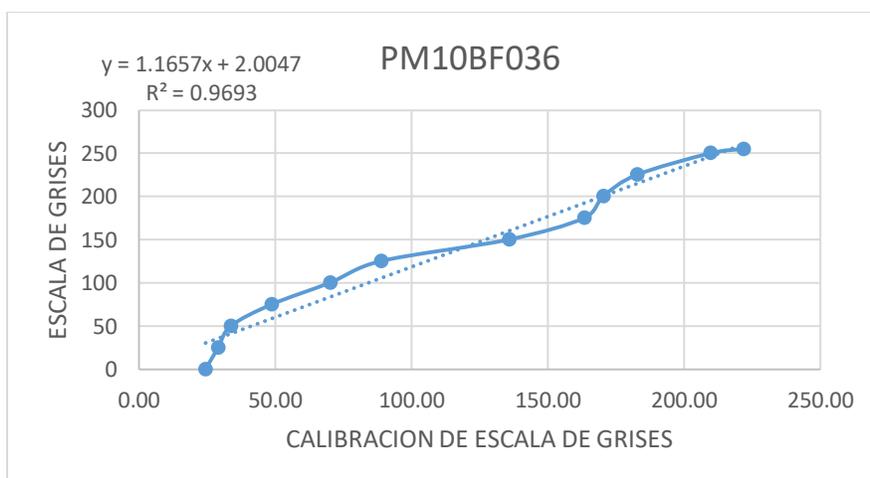
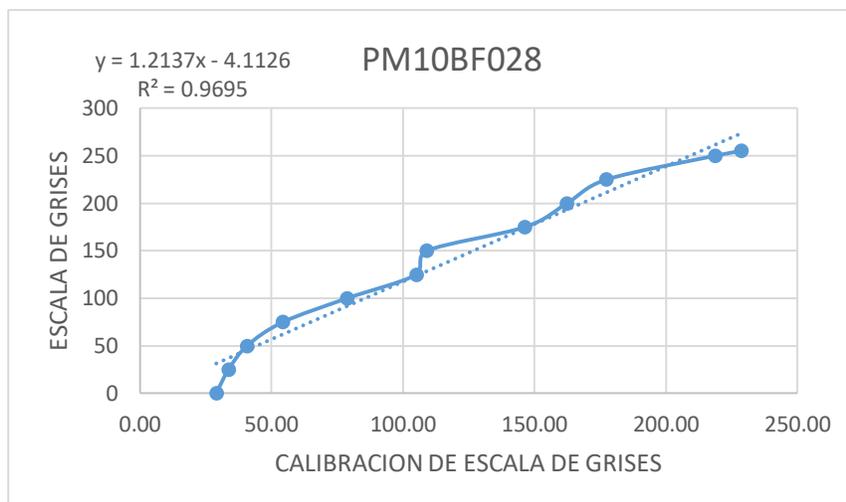
Graficas de regresión lineal para el método fotográfico.











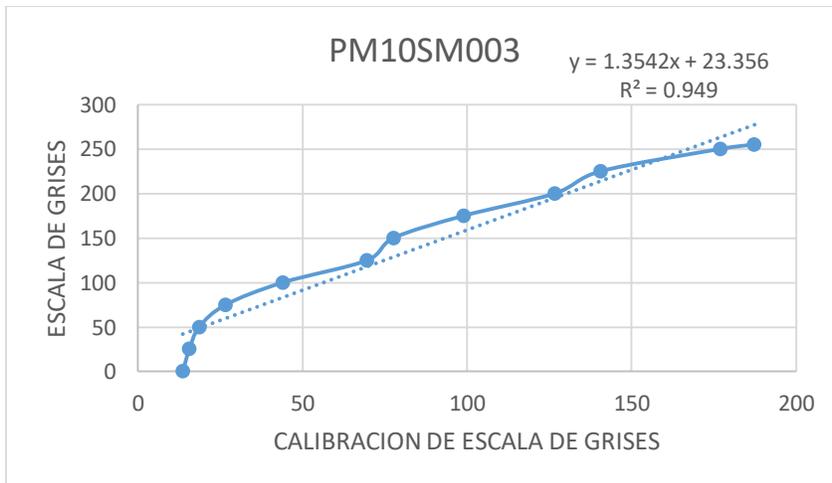
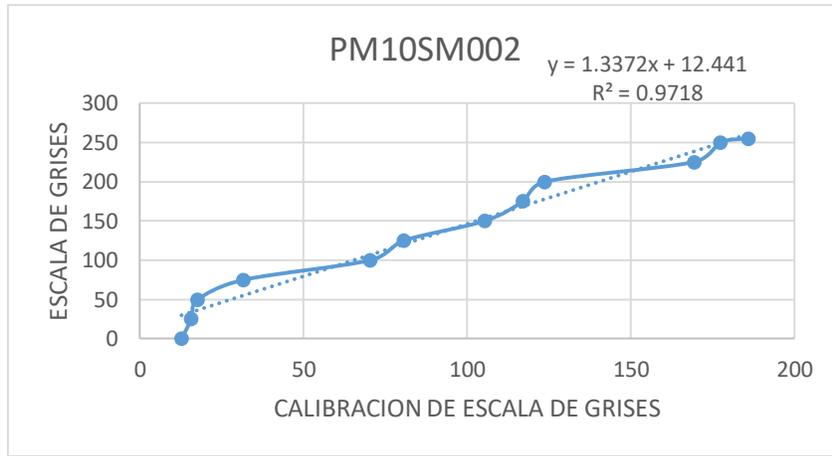
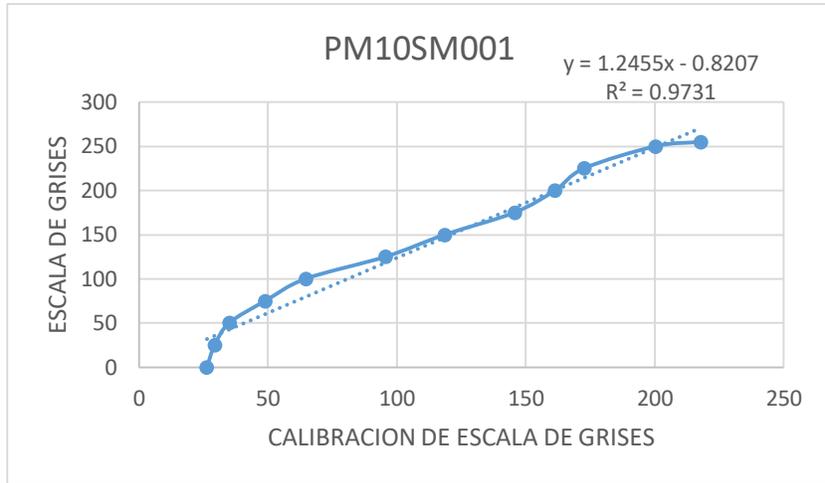
Método fotográfico			
Código	Valor Experimental	Ecuación	Valor fotos
PM10BF001	35,67	$y = 1,2052x - 2,3988$	40,59
PM10BF002	35,00	$y = 1,3149x + 22,348$	68,37
PM10BF003	35,00	$y = 1,1823x + 10,974$	52,35
PM10BF004	73,00	$y = 1,232x + 10,171$	100,11
PM10BF005	29,33	$y = 1,2435x + 2,9537$	39,43
PM10BF006	68,33	$y = 1,3605x + 22,348$	115,32
PM10BF009	64,67	$y = 1,2244x + 15,332$	94,51
PM10BF011	31,67	$y = 1,2157x - 10,695$	27,87
PM10BF014	68,33	$y = 1,2188x + 11,176$	94,46
PM10BF024	48,67	$y = 1,2648x + 8,5083$	70,06
PM10BF028	43,00	$y = 1,2137x - 4,1126$	48,08
PM10BF036	52,33	$y = 1,1657x + 2,0047$	63,01

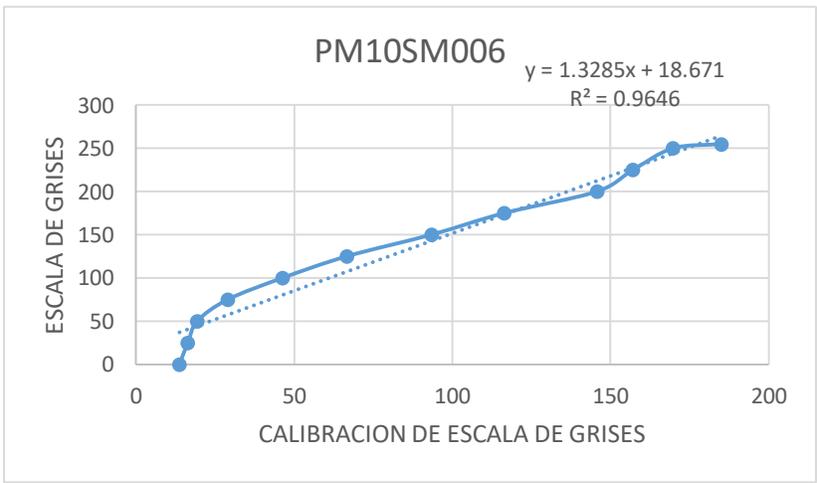
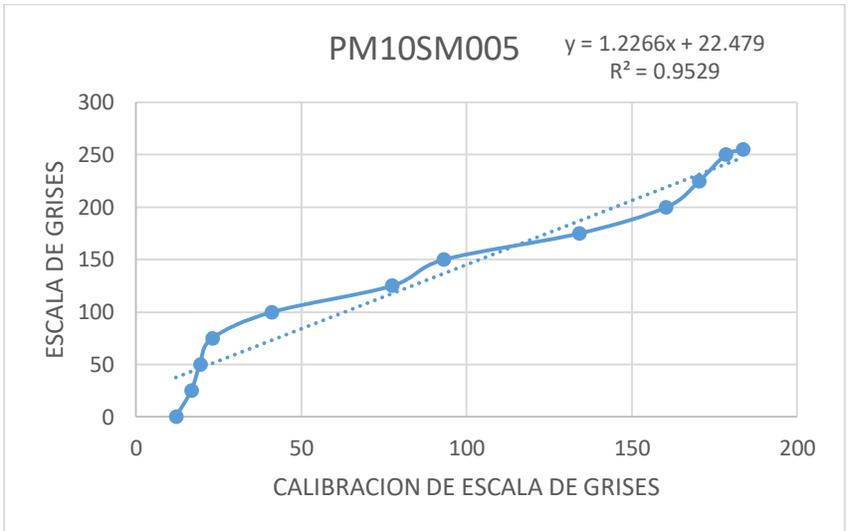
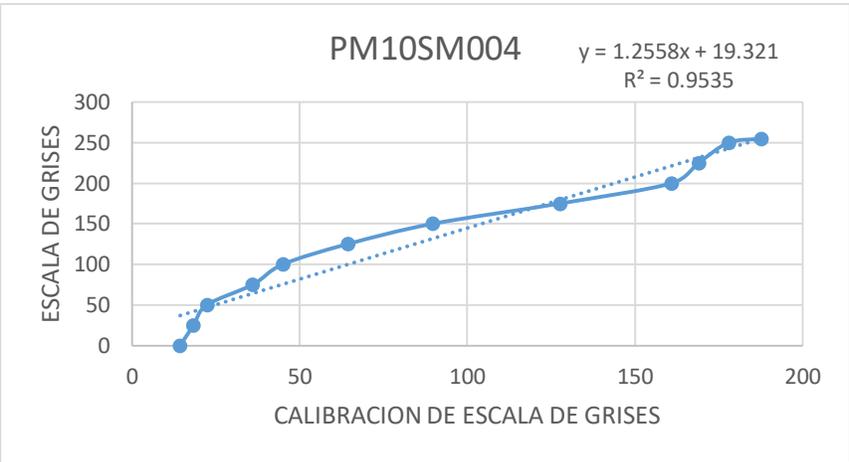
Sector Movilidad PM10

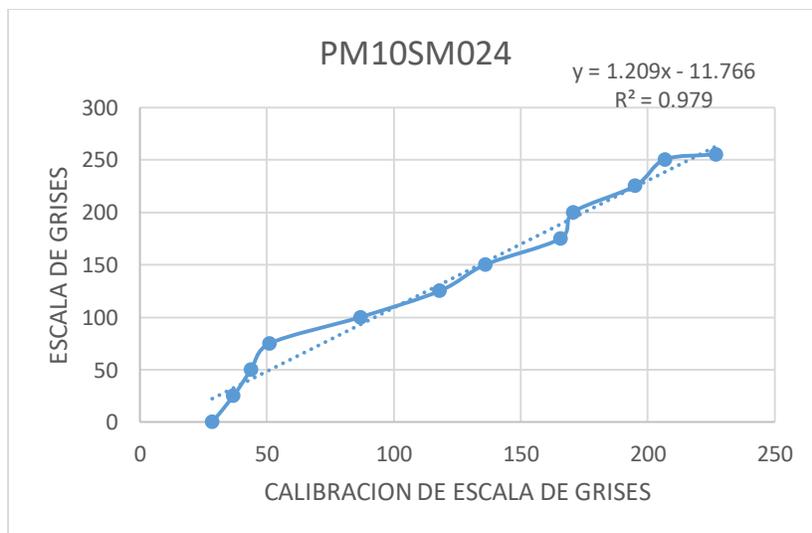
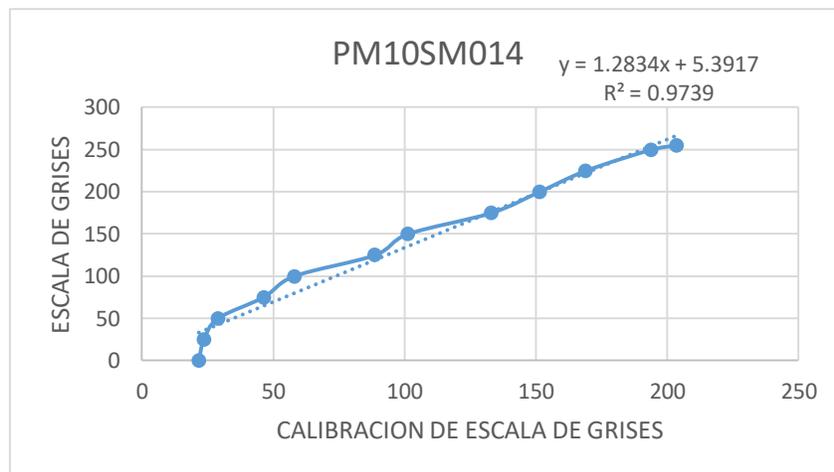
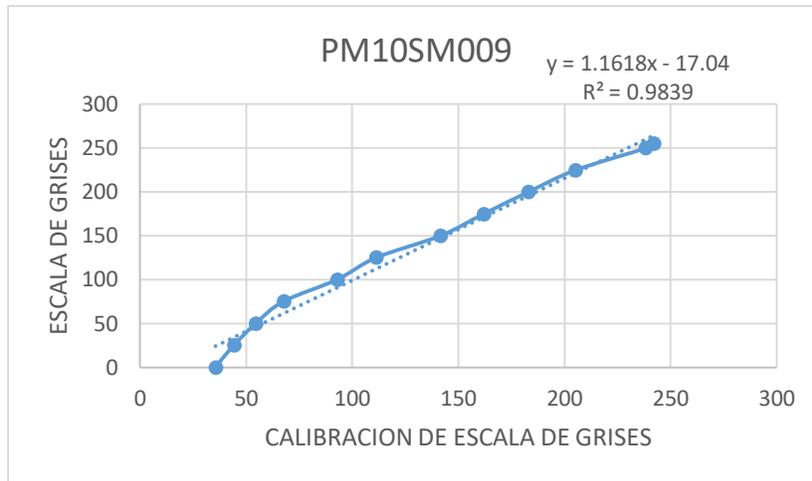
Estación	Fecha	Código	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3	Valor experimental
Movilidad	27/02/2018	PM10SM001	17	18	25	20
Movilidad	1/03/2018	PM10SM002	17	19	19	18,33
Movilidad	3/03/2018	PM10SM003	54	56	60	56,67
Movilidad	7/03/2018	PM10SM004	27	40	44	37
Movilidad	9/03/2018	PM10SM005	49	32	30	37
Movilidad	11/03/2018	PM10SM006	115	122	105	114
Movilidad	19/03/2018	PM10SM009	111	72	97	93,33
Movilidad	29/03/2018	PM10SM014	102	110	97	103
Movilidad	22/04/2018	PM10SM024	61	59	40	53,33
Movilidad	24/04/2018	PM10SM025	19	21	21	20,33
Movilidad	26/04/2018	PM10SM026	38	45	37	40
Movilidad	20/05/2018	PM10SM028	27	30	27	28

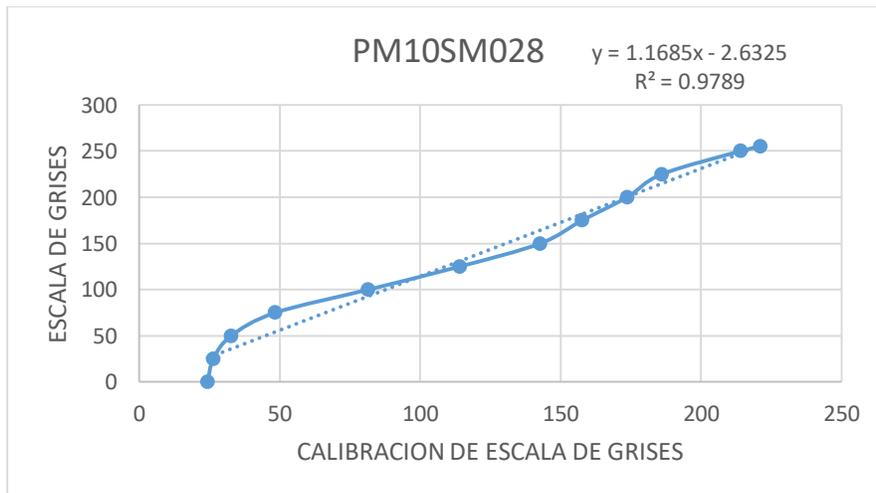
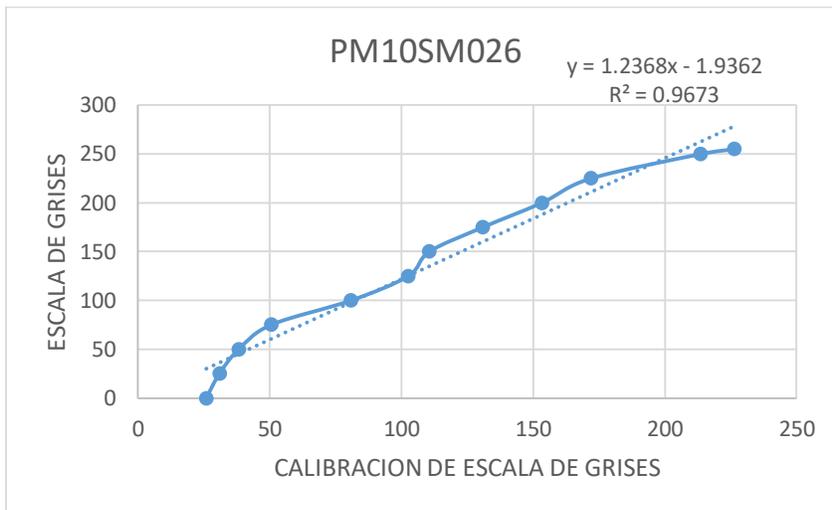
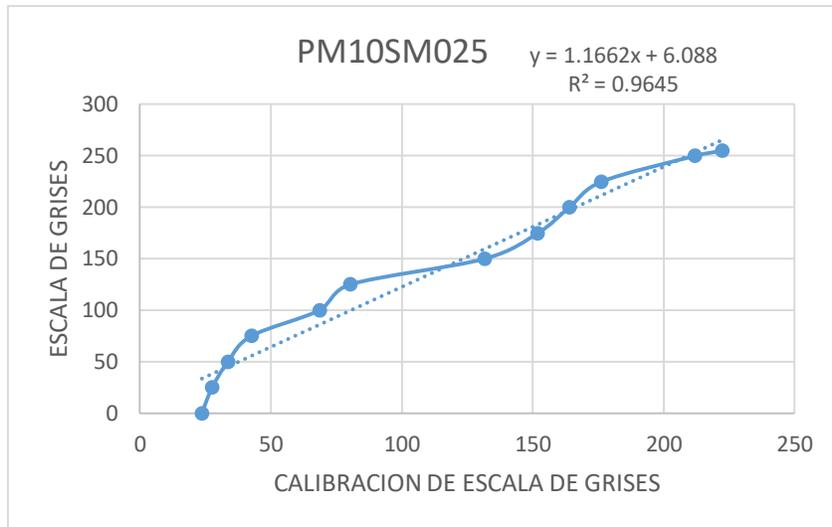
ESCALA DE BANDA DE GRISES											
0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	255
26,33	29,33	35	49	64,67	95,67	118,67	145,67	161,33	172,67	200,33	218
12,67	15,67	17,67	31,67	70,33	80,67	105,33	117	123,67	169,33	177,33	186
13,67	15,67	18,67	26,67	44	69,67	77,67	99	126,67	140,67	177	187,33
14,33	18,33	22,33	36	45	64,33	89,67	127,67	161	169	178	187,67
12	16,67	19,33	23	41	77,33	93	134	160,33	170,33	178,33	183,67
13,67	16,33	19,33	29	46,33	66,67	93,33	116,33	145,67	157	169,67	185
35,67	44,33	54,67	67,67	93	111,33	141,67	162	183	205,33	238,33	242
21,67	23,67	29	46,33	58	88,67	101,33	133	151,33	169	194	203,67
28,33	36,67	43,67	51	86,67	118	136	165,67	170,67	195	206,67	226,67
23,67	27,67	33,67	42,67	68,67	80,33	131,67	152	164	176,33	212	222,33
26	31	38,33	50,67	81	102,67	110,67	131	153,33	172	213,67	226,33
24,33	26,33	32,67	48,33	81,33	114	142,67	157,67	173,67	186	214	221

Graficas de regresión lineal para el método fotográfico.









Método fotográfico			
Código	Valor experimental	Ecuación	Valor fotos
PM10SM001	20,00	$y = 1.2455x - 0.8207$	24,09
PM10SM002	18,33	$y = 1.3372x + 12.441$	36,96
PM10SM003	101,11	$y = 1.3542x + 23.356$	160,28
PM10SM004	37,00	$y = 1.2558x + 19.321$	65,79
PM10SM005	37,00	$y = 1.2266x + 22.479$	67,86
PM10SM006	114,00	$y = 1.3285x + 18.671$	170,12
PM10SM009	93,33	$y = 1.1618x - 17.04$	91,39
PM10SM014	103,00	$y = 1.2834x + 5.3917$	137,58
PM10SM024	53,33	$y = 1.209x - 11.766$	52,71
PM10SM025	20,33	$y = 1.1662x + 6.088$	29,80
PM10SM026	40,00	$y = 1.2368x - 1.9362$	47,54
PM10SM028	28,00	$y = 1.1685x - 2.6325$	30,09

ANEXO E. Datos de transmisómetro Sootscan OT21.

Código del filtro	UV	IR
PM10CS001	429,3	281,6
PM10BF001	Too Dark	Too Dark
PM10SM001	Too dark	Too dark
PM2,5CS001	373,6	231
PM10CS002	342,3	179
PM10BF002	Too dark	Too dark
PM10SM002	Too dark	Too dark
PM2,5CS002	277	137
PM10CS003	267	113
PM10BF003	460	302
PM10SM003	458	292
PM2,5CS003	253	106
PM10CS004	160	72
PM10BF004	421	246
PM10SM004	402	242
PM2,5CS004	153	71
PM10CS005	203,3	101
PM10BF005	439	270,3
PM10SM005	401	236
PM2,5CS005	198	99
PM10CS006	171	76
PM10BF006	302,3	167
PM10SM006	186,3	85
PM2,5CS006	155	70
PM10CS009	186	70
PM10BF009	384,6	220,6
PM10SM009	339	179
PM10CS011	430	223
PM10BF011	Too dark	Too dark
PM2,5CS011	415	217
PM10CS014	97	37,6
PM10BF014	332	117
PM10SM014	284	148
PM2,5CS014	102,3	42
PM10CS016	340	195
PM2,5CS016	343,3	199

PM10BF024	348,3	186
PM10SM024	345,6	192,6
PM2,5CS024	130	61
PM10CS025	217	109
PM10SM025	Too dark	Too dark
PM2,5CS025	195	96
PM10CS026	203	102
PM10SM026	400,6	243,3
PM2,5CS026	181	93
PM10CS028	158	74
PM10BF028	454	282,3
PM10SM028	428	273
PM2,5CS028	151	73
PM10CS036	110	46,6
PM10BF036	369,6	208
PM2,5CS036	101	44

ANEXO F. Acta de inicio del proyecto de investigación.

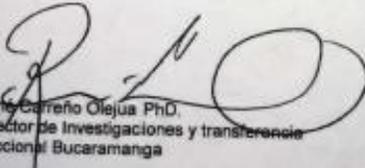
 **Universidad
Pontificia
Bolivariana**

LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES Y TRANSFERENCIA

HACE CONSTAR QUE:

El docente Kento Taro Magara Gómez, identificado con CC 91.289.494 expedida en Bucaramanga, realizó la entrega de los informes técnicos de la investigación generada dentro del Acuerdo de Cooperación AC N 006 cuyo objeto es **"Fortalecimiento de capacidades investigativas en ciencias ambientales mediante el desarrollo de métodos de análisis químico de alta resolución para análisis de la calidad del aire"**, Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga. Teniendo en cuenta que los acuerdos están regulados por el Convenio Marco de ciencia y tecnología No 5226851 UPB-ECOPETROL S. A. reglamentada por la cláusula decima primera: "Toda la información que se genere conjuntamente durante el desarrollo del convenio Marco, sus acuerdos de cooperación y/o convenios específicos y que se configure en formatos escritos, electrónicos, ópticos, magnéticos o en cualquier otro formato conocido o por conocerse, forma parte de la Información Confidencial y no podrá revelarse sin previo consentimiento de las partes.

Se expide este certificado a los 14 días del mes de diciembre de 2018.


Rene Carreño Olejua PhD,
Director de Investigaciones y transferencia
Seccional Bucaramanga

www.upb.edu.co

SEDE MEDELLÍN Campus de Laureles Circular 1° N° 70-01 / Teléfono: (057) (4) 419015 / Fax: (057) (4) 2902080 / Apartado Aéreo 56006 / E-mail: conrebo@upb.edu.co
SECCIONAL BUCARAMANGA Autopista Páramo Km 7 / Teléfono: (057) (7) 6796220 / Fax: (057) (7) 6796321 / E-mail: info@upb.edu.co
SECCIONAL MONTERÍA Km. 8 Cerete / Teléfono: (057) (4) 7860148 / Fax: (057) (4) 7860912 / E-mail: conrebo@upbmonteria.edu.co
SECCIONAL PALMIRA Sembrano Cristo Sacerdote, Km. 1 – Via Tienda Nueva / Teléfono: (057) (2) 2702945 / Fax: (057) (2) 2720121 / E-mail: info@upb.edu.co
www.upb.edu.co / Colombia / Suramérica