



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Caracterización de la Contaminación por Material Particulado en Bogotá mediante Fotometría Solar**

**Luis Alvaro Hernandez Gonzalez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2016

# **Caracterización de la Contaminación por Material Particulado en Bogotá mediante Fotometría Solar**

**Luis Alvaro Hernandez Gonzalez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería Ambiental**

Director:  
**Rodrigo Jiménez Pizarro, Ph.D.**

Línea de Investigación:  
**Calidad del aire**  
Grupo de Investigación:  
**Calidad del Aire**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá D.C., Colombia  
2016

*A mis padres por hacer de mi lo que soy, a mi esposa por estar conmigo incondicionalmente, a mis hijas por hacer que todo valga la pena...*

## Agradecimientos

Primeramente a Dios, por la oportunidad de vivir la vida que tengo, por enviarme a la maravillosa familia donde crecí y por poner en mi camino a grandes personas que han hecho posible tantas cosas buenas en mi vida.

A mis padres por su apoyo incondicional a lo largo de este camino, lleno de logros, dificultades y gratas experiencias, que han hecho de mi lo que soy ahora.

A mi esposa por su amor, su apoyo, su paciencia, por acompañarme y confortarme cuando más lo necesité, además de darme los tres grandes tesoros de mi vida.

Al Profesor Rodrigo Jiménez Pizarro Ph.D., por su apoyo, su confianza, su infinita paciencia y por ser más que un profesor un ejemplo de vida, al que seguramente no alcanzare, pero siempre contara con mi admiración. Le agradezco por enseñarme tantas cosas, no solo técnicas, sino también personales, pero sobre todo por sus consejos que en el momento indicado me ayudaron a tomar decisiones que definitivamente cambiaron mi vida.

Al Ingeniero Juan Camilo Cely, por su enorme colaboración a lo largo de todo este proyecto que nos llevó mucho tiempo y mucho esfuerzo, en el que siempre estuvo dispuesto a ayudar.

Al Grupo de Investigación de Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá (GICA), en cabeza de los ingenieros Néstor Yezid Rojas Roa, Luis Carlos Belalcazar y Rodrigo Jiménez, además de todos los demás miembros que en su momento nos brindaron su apoyo para culminar este proyecto.

A la Secretaria distrital de Ambiente (SDA), por permitirnos operar nuestros equipos en sus estaciones de la RMCAB y proporcionarnos su ayuda ampliamente.

A la organización del edificio EL CUBO de Colsubsidio, por abrirnos sus puertas y brindarnos todo el apoyo logístico que necesitamos durante la campaña de fotometría.

Finalmente, agradezco a la Ingeniera Ana Villalobos MSc, con quien tuve el placer de trabajar en mi corta estancia en la University Wisconsin – Madison, de quien aprendí mucho e hizo mi estadía mucho más agradable.

# Contenido

Agradecimientos.....	4
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>7</b>
<b>Resumen:</b> .....	<b>9</b>
1. Introducción .....	11
2. Marco teórico.....	13
2.1 Aerosoles atmosféricos.....	13
2.2 Fotometría solar.....	17
2.2.1 Ley de Beer Lambert Bouguer .....	18
2.2.2 Espesor óptico de Aerosoles (AOT) .....	19
2.2.3 Exponente de Angstrom .....	21
2.2.4 Correlación AOT - AE .....	22
2.2.5 Agua precipitable.....	23
2.2.6 Distribución de tamaños .....	23
2.2.7 Albedo de dispersión simple (SSA) .....	23
2.3 Aerosol Robotic Network – AERONET .....	24
2.4 Muestreo y análisis de material particulado .....	25
3. Materiales y métodos .....	27
3.1 Fotómetro solar CIMEL 318 .....	27
3.1.1 Descripción .....	27
3.1.2 Procesamiento de datos.....	30
3.1.3 Calibración .....	32
3.1.4 Productos de observaciones solares directas .....	34
3.1.5 Productos de observaciones indirectas (inversión) .....	34
3.2 Desarrollo de equipos.....	36
3.2.1 Soporte para fotómetro solar AERONET .....	36

3.2.2	Unidades para muestreo de material particulado PM10.....	39
3.3	Caracterización de Aerosoles por Sensado Remoto y medición In situ en Bogotá – CASERIBO .....	42
3.3.1	Selección de sitios de muestreo y monitoreo .....	43
3.3.2	Muestreo y análisis de composición de PM10 .....	47
4.	Resultados, análisis y discusión.....	49
4.1	Cobertura nubosa y potencial de la fotometría en Bogotá como técnica de monitoreo .....	49
4.1.1	Análisis de captura de datos.....	50
4.2	Análisis de mediciones solares directas.....	53
4.2.1	Espesor óptico de Aerosoles (AOT) .....	53
4.2.2	Exponente de Angstrom (AE) .....	60
4.2.3	Correlación AOT – AE.....	63
4.2.4	Distribución del AOT entre fracción fina y gruesa.....	63
4.2.5	Vapor de agua precipitable .....	66
4.3	Análisis de productos de inversión .....	67
4.3.1	Distribución de tamaños .....	67
4.3.2	Albedo de dispersión simple .....	69
4.4	Análisis de composición de PM10 .....	70
4.4.1	Análisis de fracciones de carbono .....	73
4.5	Análisis de relaciones entre propiedades fotométricas y composición .....	75
4.5.1	Correlación PM10 – AOT_500nm .....	75
4.6	Análisis de correlación entre AOT y PMx.....	77
5.	Conclusiones y perspectivas.....	81
6.	Referencias.....	83
7.	Anexos.....	86

## Lista de figuras

Figura 2-1 balance radiativo del planeta .....	15
Figura 2-2 Forzamiento radiativo. ....	16
Figura 2-3 Esquema del principio de fotometría solar .....	19
Figura 2-4 Diagramas de dispersión AOT versus AE, a la izquierda la estación del GSFC en Washington, caracterizada por aerosoles urbanos. A la derecha una estación caracterizada por aerosoles continentales ubicada en la ciudad de Sevilleta-Mexico. Ambos tomados de Holben et. al., 2001 .....	22
Figura 2-5 Mapa actual de sitios de monitoreo AERONET .....	24
Figura 2-6 Impactador Harvard .....	26
Figura 3-1 Componentes del fotómetro Solar Cimel 318.....	28
Figura 3-2 Operación del escenario Almucantar .....	35
Figura 3-3 Operación del escenario Plano Principal.....	36
Figura 3-4 Trípode construido específicamente para el fotómetro AERONET .....	38
Figura 3-5 Fotómetro Solar Cimel #317 en operación .....	39
Figura 3-6 Unidades de muestreo de material particulado PM10.....	41
Figura 3-7 Estación de monitoreo Parque Simón Bolívar (PSB) de la RMCAB .....	42
Figura 3-8 Sitios de Monitoreo AERONET y Muestreo CASERIBO.....	46
Figura 3-9 Cronograma de campaña CASERIBO .....	48
Figura 4-1 Comparación del volumen de datos en los tres niveles de calidad AERONET y su relación con la precipitación mensual. Las series #datos_1.0* y #datos_1.5* corresponden a la cantidad de datos que no logro ascender de nivel. La altura total de la columna corresponde a la cantidad total de datos nivel 1.0 para cada mes.....	50
Figura 4-2 Promedio mensual de Radiación solar global para el periodo de observación ..	52
Figura 4-3 Precipitación diaria para el periodo de observación .....	52
Figura 4-4 Promedio diario de precipitación para cada mes del periodo de observación ..	53
Figura 4-5 Dispersión diaria del AOT a 500nm .....	54
Figura 4-6 Promedios mensuales de AOT.....	54
Figura 4-7 Relación entre el AOT a todas las longitudes de onda y el AOT a 1020nm. Las series se identifican con **, porque no muestran valores de AOT, pero si su relación respecto al AOT a 1020nm. ....	55
Figura 4-8 Composición del AOT a 500 nm .....	55
Figura 4-9 Frecuencia relativa de los datos de AOT para todas las longitudes de onda .....	56
Figura 4-10 Distribución de frecuencia horaria para los datos de AOT .....	57
Figura 4-11 Promedios mensuales de AOT a 500nm .....	58
Figura 4-12 Distribución de los promedios diarios de AOT a 500nm.....	59

Figura 4-13 Comparación del comportamiento AOT a 500nm, Precipitación y Radiación solar global.....	60
Figura 4-14 Promedio mensual del exponente de Angstrom a 500nm .....	61
Figura 4-15 Promedio mensual del exponente de Angstrom a 500nm .....	62
Figura 4-16 Distribución de los datos de AE a 500nm.....	62
Figura 4-17 Diagrama de dispersión entre el AOT y el AE a 500 nm.....	63
Figura 4-18 Distribución entre los dos modos de AOT a 500nm, para los modos fino y grueso .....	65
Figura 4-19 Comparación de la distribución del AOT a 500nm entre el modo fino y grueso (promedio mensual) y su relación con la tasa de precipitación mensual. La altura total de la columna corresponde al AOT total a 500nm.....	65
Figura 4-20 Distribución del AOT a 500nm entre el modo fino y grueso (promedio diario) para cada día de la semana .....	66
Figura 4-21 Promedios diarios del contenido vapor de agua precipitable en la columna atmosférica.....	66
Figura 4-22 Comparación entre los promedios mensuales de contenido vapor de agua precipitable en la columna atmosférica y la tasa de precipitación mensual .....	67
Figura 4-23 Distribuciones de tamaño 2.0 obtenidas durante toda la campaña de monitoreo.....	69
Figura 4-24 Albedo de dispersión simple nivel 2.0 obtenidos durante toda la campaña de monitoreo.....	69
Figura 4-25 Fracciones de PM10 contra la concentración inicial del mismo .....	71
Figura 4-26 Rosas de viento para los meses de la campaña de monitoreo AERONET.....	73
Figura 4-27 Fracciones de Carbono presentes en el PM10 analizado .....	73
Figura 4-28 Relación entre OC y EC.....	74
Figura 4-29 Diagramas de dispersión de AOT contra PM10. Arriba a la izquierda, mediciones de agosto a octubre del 2000, en una ciudad del norte de Italia, tomado de Chu, 2003. Arriba a la derecha, Background de AOT para sitios rurales de Europa en 2003, tomado de Koelemeijer, 2006. Abajo mediciones para la ciudad de Zanzan al noroeste de Irán, a la derecha para la estación de invierno y a la izquierda para el verano para el periodo 2009 – 2010. ....	76
Figura 4-30 Correlación entre el AOT y el PM10 .....	76
Figura 4-31 Serie de PM10 tomado por la RMCAB .....	77
Figura 4-32 Correlación entre el AOT total y el AOT para el modo fino .....	78
Figura 4-33 Correlación entre PM10 y PM2,5.....	78
Figura 4-34 Correlación entre PM10 y PM1 .....	79
Figura 4-35 Correlación entre PM1 y PM2,5 .....	79



**Resumen:**

Los aerosoles atmosféricos antropogénicos afectan negativamente la salud humana, el ciclo hidrológico y la química atmosférica, y perturban el balance radiativo. Usando un fotómetro solar de la red AERONET (liderada por NASA Goddard Space Flight Center) instalado y operado en Bogotá (*UNC\_Bogota*, 4,6°N, 74,08°W), y equipos auxiliares desarrollados en el marco de este proyecto, se realizó la campaña de medición de aerosoles “CASERIBO” entre marzo y septiembre de 2013. CASERIBO permitió determinar características microfísicas y radiativas de los aerosoles en Bogotá. El espesor óptico de aerosoles (AOT) a 500 nm durante el periodo de medición fue  $0,13 \pm 0,11$ , valor indicativo de una atmosfera urbana ligeramente contaminada. El exponente de Angstrom promedio encontrado fue de  $1,27 \pm 0,25$ , valor que indica la presencia dominante de partículas finas probablemente de origen antropogénico y posiblemente resultantes de combustión incompleta. El uso de mediciones de radiancia atmosférica permitió estimar distribuciones de tamaño de partícula, las cuales resultaron ser bimodales con diámetros modales de  $\sim 0,3 \mu\text{m}$  y  $\sim 10 \mu\text{m}$ . CASERIBO también incluyó muestreo y análisis de composición de material particulado (PM10) en Bogotá (Estación IDR D de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, 4.4°N, 74.05°W). Estas mediciones lograron reconstruir en promedio un  $\sim 55\%$  del material particulado muestreado. La fracción identificada está compuesta en promedio por 64% de carbono orgánico (OC), 29% de carbono elemental (EC – hollín) y 7% de especies iónicas. Esta distribución de composición es similar a la encontrada en estudios previos.

**Palabras clave:** material particulado, espesor óptico de aerosoles (AOT), exponente de Angstrom (AE), distribución de tamaño de partícula, AERONET, Carbono Elemental (EC), Carbono Orgánico (OC).

**Abstract:**

The anthropogenic atmospheric aerosols negatively impact the human health, the hydrological cycle and the atmospheric chemistry, and disturb the radiative balance. Using a sun photometer from the AERONET network (led by NASA Goddard Space Flight Center), installed and operated at Bogota – Colombia (*UNC\_Bogota*, 4.6°N, 74.08°W), and ancillary hardware developed within this project, the aerosol measurement campaign “CASERIBO” was carried out between March and September 2013. CASERIBO allowed determining microphysical and radiative properties of aerosols over Bogota. The aerosol optical thickness (AOT) at 500 nm during the measurement period was  $0.13 \pm 0.11$ , a value that indicates a slightly polluted urban atmosphere. The average Angstrom exponent measured was  $1.27 \pm 0.25$ , a value that indicates an atmosphere populated mostly by fine particles, very likely of anthropogenic origin and possibly resulting from incomplete combustion. Atmospheric radiance measurements allowed deriving aerosol size distributions, which turned to be bimodal with modal diameters of  $\sim 0,3 \mu\text{m}$  y  $\sim 10 \mu\text{m}$ . CASERIBO also included sampling and chemical analysis of particulate matter (PM10) in Bogota (IDRD site of Bogota’s air quality monitoring network – RMCAB, 4.4°N, 74.05°W). These measurements achieved to explain  $\sim 55\%$  of the sampled particulate matter on average. The explained fraction is on average composed of 64% organic carbon (OC), 29% elemental carbon (EC – soot) and 7% of ionic species. This composition distribution is similar the found in previous studies.

**Key words:** particulate matter, Aerosol Optical Thickness (AOT), Angstrom exponent (AE), particle size distribution, AERONET, Elemental Carbon (EC), Organic Carbon (OC).

# 1. Introducción

El principal problema de calidad del aire en Bogotá está constituido por el material particulado (PM), el cual no es otra cosa que una serie de partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, de las cuales una fracción específica corresponde a los aerosoles atmosféricos.

Los contaminantes atmosféricos gaseosos, generalmente poseen un umbral de concentración a partir del cual se consideran dañinos para la salud, mientras que el PM no registra una concentración mínima que genere efectos nocivos y para estimar su toxicidad y su impacto en la salud pública y el clima se debe conocer su concentración y además caracterizar su composición y distribución de tamaño de partícula. Adicionalmente se debe considerar que además del PM emitido directamente (aerosoles primarios), en la atmosfera se forma una fracción importante de PM (aerosoles secundarios) a partir de gases traza y por mecanismos complejos (poco entendidos actualmente) (Jimenez et al, 2009). Todo esto hace que el estudio de la contaminación por PM sea altamente complejo. Variables como la concentración, composición, distribución de tamaño de partícula, reactividad y tiempo de residencia de los aerosoles en la atmósfera cambian espacial y temporalmente, lo cual es evidente en las series temporales de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) de la Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) y en los estudios disponibles sobre composición (Vargas & Rojas, 2010; Pachón & Sarmiento, 2008) y tamaño de partícula (Galvis & Rojas, 2006) de PM en Bogotá.

Las concentraciones anuales de PM<sub>10</sub> (partículas menores a 10 micrómetros) en Bogotá, Medellín y Cali son entre 2 y 4 veces más altas que el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2006), lo que las pone entre las 20 ciudades más contaminadas de América Latina (WHO, 2011). Recientemente Hernández (2009) atribuye en su estudio el 75% del incremento de disfunciones respiratorias de preescolares en Bogotá al PM<sub>10</sub>, mientras que Echeverry (2009) encontró que cerca del 30% de las enfermedades en preescolares en Medellín son atribuibles al PM<sub>10</sub> y sus contaminantes asociados, lo que implica un costo incremental de 4 MUSD/año.

Si bien en los últimos años se ha avanzado en el control de la contaminación y siendo Bogotá probablemente la ciudad más estudiada en el país, aún es muy limitado nuestro conocimiento acerca de la composición (Vargas & Rojas, 2010; Pachón & Sarmiento, 2008), y la distribución de tamaño (Galvis & Rojas, 2006) del PM en Bogotá. Obtener dicha información no solo representa una herramienta para la toma de decisiones tendientes a la regulación y a la mitigación, sino que también servirá para validar modelos de simulación

atmosférica (Zarate, 2007), los cuales permitirán predecir el impacto en la calidad del aire de programas de mitigación de emisiones. La calidad de los datos de composición, distribución de tamaño y perfiles verticales de PM establecidos en las mediciones determinara la calidad de los resultados de la simulación.

A pesar de que existe una profunda relación entre la composición del PM y su distribución de tamaño de partícula, al no existir mediciones simultáneas de ambos parámetros en Bogotá, se hace imposible determinar dicha correlación que a su vez, sería útil para determinar las fuentes de emisión y la intensidad de las mismas. La investigación realizada por Vargas & Rojas (2010) en la que se tomaron muestras en tres localidades de Bogotá, mostro que cerca del 40% de la masa de PM corresponde a polvo resuspendido y fugitivo (minerales), mientras que la materia orgánica representa el ~39% (posibles aerosoles secundarios), el carbono elemental u hollín fue del ~12% y el porcentaje restante corresponde a la fracción iónica. En cuanto a la distribución de tamaño de partícula, Galvis & Rojas (2006) sugieren diámetros modales de distribución de masa de ~10 micrómetros y ~200 nm, lo que sugeriría que la concentración de partículas ultrafinas (< 100 nm) en Bogotá es significativa y considerando que aproximadamente el 50% de dichas partículas se depositan en los alveolos pulmonares al ser inhaladas, se puede apreciar el riesgo que genera la contaminación por PM para la salud pública.

Una alternativa para llevar obtener las distribuciones de tamaño de partícula, así como un indicativo de la carga de las mismas en la atmosfera es la fotometría solar, la cual se basa en redes de equipos basados en tierra, los cuales apuntan al cielo y son capaces de medir diferentes propiedades de la fracción de PM conocida como aerosoles atmosféricos. A nivel mundial existe una red llamada AERONET (Aerosol Robotic Network) la cual provee una base de datos pública con propiedades de los aerosoles atmosféricos.

En Colombia hasta finales de 2012 no existía ninguna estación AERONET, de hecho en la región noroccidental de Suramérica (los Andes Tropicales) existía una brecha de 11° de latitud sin información entre la estación de Panamá BCI (~ 9°N) y la de Balbina (~ 2°S) en la Amazonia brasileña. Esta brecha es de ~ 27° de latitud cuando se ven los Andes específicamente (11°N, 16°S), ya que el sitio AERONET más septentrional de los Andes se encuentra en La Paz (~ 16°S), Bolivia (Jiménez, 2010). Por lo anterior, en el marco del proyecto AERONET-Colombia - Exploratory and long-term aerosol remote sensing in the Tropical Andes, se estableció la estación de la red AERONET, UNC\_Bogota (4.6°N, 74.08 ° W), ubicada en los alrededores del campus de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, cuya información en tiene un enorme valor científico, debido entre otras razones a las condiciones de circulación atmosférica de la zona tropical del planeta. La estación UNC\_Bogota registró datos por primera vez en febrero de 2012 con el fotómetro #317.

El proyecto CASERIBO - Caracterización de Aerosoles por Sensado Remoto y medición In situ en Bogotá, busca aprovechar la disponibilidad de datos fotométricos en Bogotá para mediante la recolección y el análisis de composición de muestras de material particulado, abordar el problema de calidad del aire descrito anteriormente desde dos frentes diferentes, uno el sensado remoto y dos el muestreo in situ que posteriormente llevara a un análisis de composición química mediante técnicas avanzadas de laboratorio. Estos dos puntos de vista nos permitirán entender posibles correlaciones entre los resultados de las dos técnicas, que pueden traer ventajas para la investigación científica.

De esa forma se planteó esta investigación cuyo objetivo general es caracterizar la composición, distribución de tamaño y espesor óptico de aerosoles (AOT) en Bogotá durante una campaña de medición y evaluar la viabilidad de monitorear el material particulado sobre Bogotá usando fotometría solar. Como objetivos específicos se buscan establecer correlaciones entre: AOT (AERONET) y concentración de PM, distribución de tamaño de partícula y la composición de aerosoles; así como evaluar la variabilidad temporal de la composición del PM en un sitio de medición en Bogotá durante el periodo de muestreo (julio a septiembre de 2013) y evaluar el impacto de las condiciones meteorológicas en las correlaciones antes mencionadas.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Aerosoles atmosféricos**

La fracción de partículas suspendidas en la atmosfera cuyo diámetro promedio oscila entre 0.001 y 100 micrómetros se conoce como aerosoles atmosféricos y pueden ser líquidas o sólidas. La importancia del estudio de dichas partículas radica en el efecto que los mismos tienen a escala regional y global sobre el clima, ya que se sabe que afectan el balance radiativo de la tierra (Satheesh & Ramanathan, 2000), tanto de forma directa por la absorción y la dispersión de la radiación solar, como de forma indirecta, alterando las propiedades de las nubes (tiempo de vida, albedo, precipitación, composición química, etc.) actuando como núcleos de condensación (Rosenfeld et al, 2008), lo cual afecta el ciclo hidrológico a escala regional e incluso global.

Los desiertos, el océano y las erupciones volcánicas son fuentes naturales de aerosoles y ponen en la atmosfera gran cantidad de partículas que son transportadas a grandes

distancias, mientras el hombre como consecuencia de sus actividades económicas es responsable del cambio en el uso del suelo, la quema de biomasa y el uso de combustibles fósiles, actividades que también aportan una cantidad importante de partículas a la estratosfera. Lo anterior es solo una muestra de la enorme dificultad que se tiene al tratar de distinguir entre los efectos causados por las emisiones de aerosoles de origen natural, y los generados por actividades humanas.

El tiempo de vida media es otro de los aspectos que ejemplifica la complejidad del estudio de los aerosoles y del impacto que estos tienen en todo el planeta. Si bien el tiempo de vida media de los aerosoles, es esencialmente una función de su tamaño y su higroscopicidad, estos pueden durar en la atmosfera desde unos instantes hasta unos 3 años aproximadamente (Jaenicke, 1980) y esta variabilidad se debe entre otras, a fenómenos tales como la coalescencia entre partículas, que es responsable de la corta duración en las atmosfera de los aerosoles más pequeños ( $>1\mu\text{m}$ ). Otro fenómeno que influye es la deposición húmeda, que se encarga de remover de la atmosfera las partículas cuyo tamaño esta entre 100 nm y 10  $\mu\text{m}$ , y finalmente, las partículas más grandes, cuyos tiempos de vida media son relativamente cortos, debido a que cae por su propio peso a la tierra.

Una vez entendida la gran variabilidad en los tiempos de vida de los aerosoles, si se considera la gran capacidad que tiene el viento para transportarlos horizontalmente, se puede inferir que partículas cuyo tamaño oscila entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ , las cuales pueden ser elevadas incluso a la alta troposfera, son capaces de viajar de un continente a otro, como se ha podido evidenciar con el polvo del desierto del Sahara, el cual después de atravesar el Atlántico Norte Subtropical se ha detectado en el continente americano. Finalmente, la liberación a la atmosfera de gases que pueden generar pequeñas partículas (aerosoles secundarios), mediante conversiones GTP (por sus siglas en ingles), las cuales pueden alcanzar tiempos de vida media suficientemente grandes como para que sean arrastradas por todo el planeta.

Para evaluar los efectos climáticos de los aerosoles, se deben conocer los parámetros que determinan sus propiedades ópticas (Kaufman et al, 2002) y físicas lo cual resulta complejo debido a la gran variabilidad espacial y temporal de sus concentraciones y propiedades, ya que en general los diferentes tipos de aerosoles dependen de la ubicación geográfica, de las condiciones meteorológicas y de la circulación atmosférica en diferentes escalas (Jiang, 2006). Adicionalmente, se debe considerar el hecho de que las emisiones de aerosoles en latitudes tropicales son dispersadas más fácilmente por todo el planeta, lo que indica que puede afectar el clima global.

Otro aspecto importante de los aerosoles, es el impacto que tienen sobre la calidad del aire, la cual, especialmente en centros urbanos, se ve afectada por los altos niveles de contaminación por material particulado (PM) (Vargas & Rojas, 2010) suspendido en la atmosfera, el cual afecta la salud pública a nivel local y regional. Según la Organización mundial de la Salud, al año se producen 2 millones de muertes prematuras a nivel global (WHO, 2011) debido a la exposición a dicho material particulado, del cual los aerosoles representan una fracción.

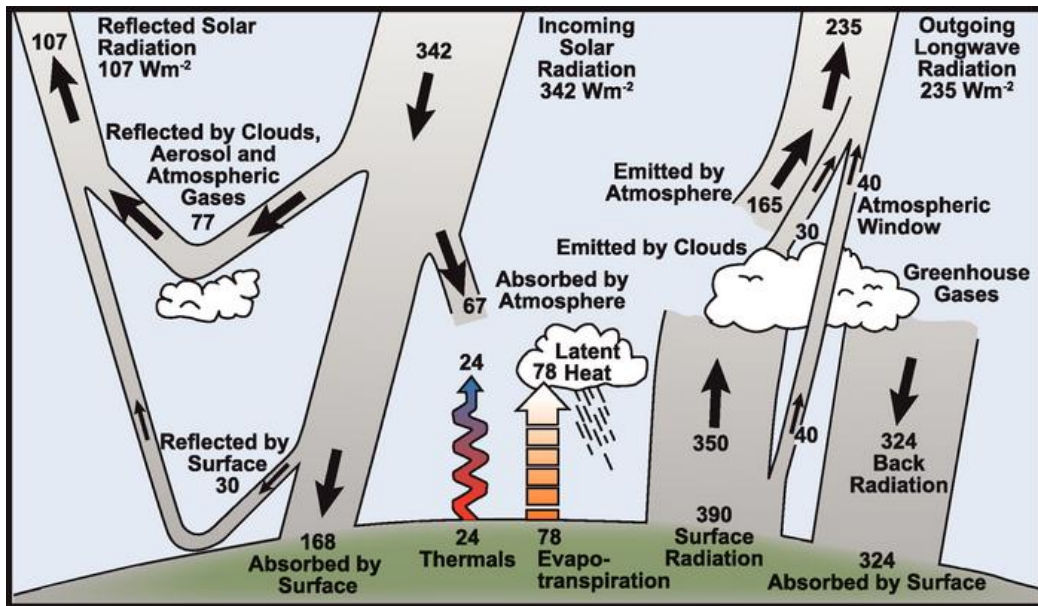


Figura 2-1 balance radiativo del planeta

Fuente: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/faq-1-1-figure-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-1-figure-1.html)

El balance radiativo del planeta es el equilibrio térmico entre la radiación que recibe el planeta del sol y la que entrega al espacio para mantener la temperatura prácticamente invariante (figura 2-1). El forzamiento radiativo directo de los aerosoles se debe a que absorben y dispersan la radiación solar que incide sobre ellos ya que su tamaño es similar al de la longitud de onda de la radiación solar, por lo que pueden interactuar eficazmente con ésta, reduciendo la irradiancia solar total que alcanza la superficie de la Tierra (Díaz, 2006). El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC), afirma que las emisiones antropogénicas de aerosoles (principalmente sulfatos, carbono orgánico, carbono negro, nitratos y polvo) generan un efecto de enfriamiento, equivalente a un forzamiento radiativo directo de  $-0,5 \pm 0,4 \text{ W/m}^2$  y un forzamiento de albedo indirecto de  $-0,7 [-1,8 \text{ a } -0,3] \text{ W/m}^2$  (Foster et al, 2007). La magnitud de estos efectos, es

comparable con la del forzamiento radiativo inducido por el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmosfera durante el siglo pasado (Foster et al, 2007), pero para su comparación se debe tener en cuenta la elevada incertidumbre que presentan los datos referentes al forzamiento radiativo de los aerosoles, contrario a lo que pasa con los cálculos de forzamiento para los GEI, cuya incertidumbre es muy baja. Por lo anterior, el efecto de los aerosoles se debe evaluar dentro del contexto de un balance energético global (figura 2-1).

Las interacciones entre las nubes y los aerosoles, ya sean naturales o antropogénicos, son altamente complejas y no siempre son de comportamiento lineal lo cual depende entre otras cosas, del tamaño y la composición química de los aerosoles que se convierten a su vez en núcleos de condensación iniciales, los cuales pueden fomentar el crecimiento de las gotas en la nube, en particular la fracción soluble en agua y la presencia de compuestos que afectan la tensión superficial (Foster et al, 2007). Lo anterior, podría afectar el ciclo hidrológico entre otras variables climáticas a escala local y regional.

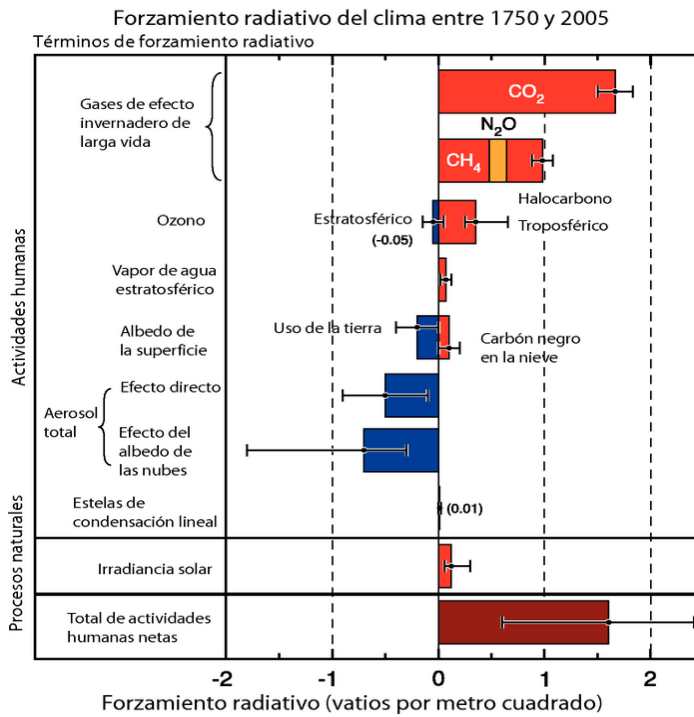


Figura 2-2 Forzamiento radiativo.

Fuente: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-2-1-figure-2.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1-figure-2.html)

Finalmente y para recapitular lo dicho hasta ahora, la gran variedad de fuentes tanto naturales como antropogénicas, su distribución espacial heterogénea a nivel regional y global, la posibilidad de ser transportados enormes distancias por los vientos, además de



su tiempo de vida media, hacen que la caracterización y modelización de los aerosoles sea una tarea altamente complicada (Estelles, 2006) pero muy importante a la hora de establecer su impacto sobre el clima global y el balance radiativo del planeta.

Debido a la gran variabilidad de las fuentes de aerosoles atmosféricos, existe diversas clasificaciones de los mismos, asociadas al origen, al tamaño o a la composición química principalmente, siendo esta última una de las que mayor utilidad presenta a la hora de determinar las propiedades de los mismos, por lo que se han desarrollado clasificaciones usando sus componentes básicos, establecer grupos de aerosoles predominantes en diferentes regiones del planeta (Hess et al., 1998), como se describe a continuación:

**Aerosol desértico:** compuesto básicamente por partículas minerales. Predominante en las zonas cercanas a desiertos. Se dice que el desierto del Sahara, aporta entre 60 y 200 millones de toneladas de aerosoles a la troposfera anualmente.

**Aerosol urbano:** predominante en zonas donde la actividad antropogénica prima, y proveniente esencialmente de procesos industriales, tráfico vehicular y zonas residenciales. Las actividades rurales como la quema de biomasa, también aportan a este tipo de aerosoles.

**Aerosol marítimo:** está compuesto principalmente por sustancias solubles en agua y partículas de sal. Es el más abundante en toda la atmósfera del planeta debido a su origen oceánico.

**Aerosol continental:** abarca las partículas generadas en los continentes, específicamente en áreas boscosas, selvas y zonas con baja actividad industrial.

**Aerosol Ártico:** Proveniente de las plataformas continentales del norte de Europa y Asia, y los océanos cercanos. Son aerosoles pequeños y se componen principalmente de minerales y partículas marinas.

**Aerosol Antártico:** Proveniente de la Antártida. Posee gran estabilidad por no encontrarse afectado por fuentes de contaminación atmosférica, y se compone principalmente de aerosoles marítimos, sulfatos y minerales (Obregón, 2012).

## **2.2 Fotometría solar**

Una valiosa herramienta para caracterizar las propiedades físicas y ópticas de los aerosoles es la teledetección (Cazorla et al, 2009) y la fotometría solar a nivel de suelo es

la técnica más común para caracterizar los aerosoles, ofreciendo una gran resolución temporal tanto de propiedades microfísicas (composición y distribución de tamaños) como radiativas (absorción e índice de refracción). Su operación está limitada a horas diurnas y con cielos despejados y sus medidas son representativas de la columna atmosférica completa (Estelles, 2006). Su principal desventaja es la escasa cobertura espacial que alcanza (cada estación), por lo que se han creado redes a escala internacional que permiten superar dicha falencia, como es el caso de AERONET (Aerosol Robotic Network), que actualmente cuenta con más 300 estaciones de monitoreo en todo el planeta.

### 2.2.1 Ley de Beer Lambert Bouguer

Cuando se estudia la incidencia de la atmosfera en la radiación solar que llega al exterior de la misma, y la que efectivamente llega a la superficie terrestre, se encuentra un diferencia considerable, más específicamente, una reducción asociada a la atenuación generada por los diferentes componentes presentes en la columna de aire que atraviesa un rayo de luz, antes de llegar a la superficie terrestre, tales como aerosoles, moléculas y a la absorción de gases como el ozono, oxígeno, vapor de agua, etc.

Dicha atenuación, se puede expresar mediante la ley de Beer Lambert Bouguer:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-m_s\tau}$$

Donde  $I$  es la irradiancia en la superficie terrestre a la longitud de onda  $\lambda$ ,  $I_0$  es irradiancia en la parte exterior de la atmosfera,  $\tau$  es el espesor óptico de toda la columna atmosférica y  $m_s$  es la masa óptica, definida como el cociente entre el espesor óptico en vertical y el espesor óptico en una dirección determinada. Una buena aproximación para el cálculo de la masa óptica es la siguiente:

$$m_s = 1/\cos \theta_s$$

Donde  $\theta_s$  es el ángulo cenital solar en radianes. La ecuación funciona adecuadamente hasta  $\theta \leq 75^\circ$  (Toledano, 2005).

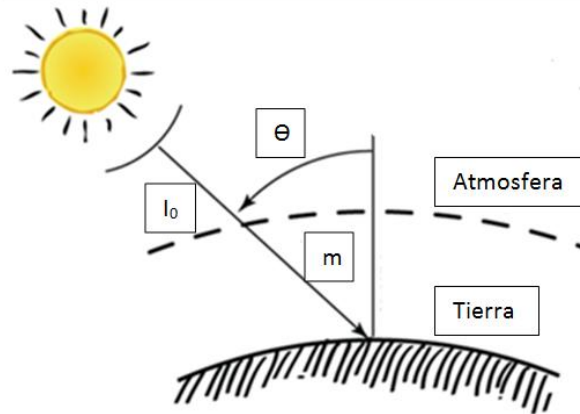


Figura 2-3 Esquema del principio de fotometría solar

Tal como se puede ver en la figura 2-3, la longitud de la atmósfera o masa óptica que debe atravesar la luz para llegar a la superficie terrestre es función del ángulo cenital y se aumenta significativamente cuando el sol se encuentra lejos del cenit. Esto se debe a la forma tangencial en la que incide sobre la tierra, razón por la cual se pueden registrar masas ópticas que van desde 7 hasta 2 aproximadamente. Esta variación en la masa óptica hace que las mediciones muy temprano en la mañana o cerca del final de la tarde, no se puedan considerar válidas, por lo que los algoritmos para filtrado de datos de AERONET descartan las mediciones realizadas cuando las masas ópticas son superiores a 5.

### 2.2.2 Espesor óptico de Aerosoles (AOT)

El espesor óptico de aerosoles (AOT por sus siglas en inglés, Aerosol Optical Thickness) es una medida de la carga de aerosoles (p. e., la polución urbana, partículas de humo, polvo, sal marina, etc.) suspendidos dentro de la columna atmosférica que tiene que atravesar la radiación solar (luz) para llegar a la superficie de los detectores del instrumento ubicado en la superficie terrestre.

La determinación del espesor óptico de aerosoles se basa en la Ley de Beer-Lambert-Bouguer y consiste en medir la extinción espectral de radiación directa en cada una de las longitudes de onda con las que cuenta el fotómetro solar Cimel. También se debe calcular y sustraer la atenuación debida a la dispersión Rayleigh, y a la absorción de ozono y otros gaseosos.

A partir de la ley de Beer Lambert Bouguer, se puede derivar una expresión para calcular el espesor óptico total:

$$\tau = -\frac{1}{m_s} \ln \frac{I}{I_0}$$

Una de las limitaciones de la técnica de fotometría solar es que se restringe a días con cielos despejados, por lo que si se dan dichas condiciones, se puede separar el espesor óptico de acuerdo a su origen, es decir, se puede obtener el espesor causado por: la absorción de los gases  $\tau_g$ , la dispersión molecular (scattering Rayleigh)  $\tau_R$  y por los aerosoles  $\tau_a$ .

El  $\tau(\lambda)_{TOT}$  es la suma de los AOT producidos por otros componentes de la atmósfera pueden dispersar la luz. El  $\tau(\lambda)_a$  es el AOT causado por los aerosoles,  $\tau(\lambda)_w$  por el vapor de agua,  $\tau(\lambda)_R$  es la dispersión de Rayleigh, y  $\tau(\lambda)_{O_3}$ ,  $\tau(\lambda)_{NO_2}$ ,  $\tau(\lambda)_{CO_2}$ ,  $\tau(\lambda)_{CH_4}$  corresponden al AOT ocasionado por ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de carbono y metano, respectivamente.

$$\tau(\lambda)_a = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_w - \tau(\lambda)_R - \tau(\lambda)_{O_3} - \tau(\lambda)_{NO_2} - \tau(\lambda)_{CO_2} - \tau(\lambda)_{CH_4}$$

El espesor óptico asociado a la dispersión de Rayleigh  $\tau(\lambda)_R$ , es conocido para una atmósfera estándar, pero se puede corregir en función de la presión atmosférica en el sitio de monitoreo, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\tau(\lambda)_a = \tau(\lambda)_{TOT} - \tau(\lambda)_R \frac{P}{P_0} - \tau(\lambda)_{gas}$$

Dónde:

$P$  es la presión atmosférica en el sitio de monitoreo,

$P_0$  es la presión estándar (101KPa),

$\tau(\lambda)_{gas}$  es el espesor óptico asociado a todos los gases que se ha agrupado.

Finalmente, si se considera que la distribución de los componentes atmosféricos no es la misma a lo largo de la columna atmosférica, se debe ajustar una masa óptica apropiada para cada componente, sobre todo cuanto el ángulo cenital es grande. Teniendo en cuenta lo anterior, la ley de Beer Lambert Bouguer, se escribe:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) e^{(-m_a \tau_a - m_R (\tau_R \frac{P}{P_0}) - m_{gas} \tau_{gas})}$$

Esta última ecuación es la que se emplea en la versión 2 del algoritmo AERONET (Toledano, 2005).

### 2.2.3 Exponente de Angstrom

La dependencia espectral del espesor óptico se parametriza habitualmente mediante la ley de Angstrom (Estelles, 2006):

$$\tau_a(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$$

Donde  $\beta$  es el parámetro de turbiedad y coincide por definición con el espesor óptico a 1  $\mu\text{m}$ , mientras que  $\alpha$  es el exponente de Angstrom y se encuentra directamente relacionado con la distribución de tamaños de aerosoles que puede estimarse a partir del espesor óptico de aerosoles a dos longitudes de onda que habitualmente son de 440 nm y 870 nm.

$$\alpha = -\frac{d \ln \tau_a}{d \ln \lambda} = \frac{\ln \frac{\tau_{a2}}{\tau_{a1}}}{\ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$$

En teoría el exponente de Angstrom toma valores que oscilan entre 0 y 4, siendo los valores bajos, indicativos de partículas grandes que no tienen dependencia espectral. Un buen ejemplo de esto es el color blanco que poseen las nubes, asociado a la dispersión de la luz al chocar con sus gotas, cuyo tamaño es de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ . Los valores de  $\alpha$  más altos, representan partículas pequeñas que presentan una fuerte dependencia espectral. Como ejemplo de esto, se tiene la dispersión de la luz asociada a las moléculas (scattering Rayleigh), que genera el color azul del cielo. Específicamente, para los aerosoles, el valor de  $\alpha$  oscila entre 0 y 2,5. Los valores cercanos a cero indican la presencia de un modo de partículas gruesas tales como polvo del desierto, mientras que valores mayores a 2,0 indican la existencia de un modo de partículas finas (p. e. humo y sulfatos) (Eck et al, 1999).

## 2.2.4 Correlación AOT - AE

Normalmente se utilizan los datos de AOT y AE a 500nm, para clasificar los aerosoles de acuerdo a una serie de criterios trabajados por otros autores. De acuerdo a la clasificación de Hess (1998), se pueden identificar tres tipos de aerosoles muy similares, como lo son, continental limpio, promedio y contaminado, los cuales se caracterizan por tener un AE alrededor de 1,4 y varían en cuanto al nivel de AOT que presentan, específicamente se tienen valores de 0,064, 0,151 y 0,372 respectivamente.

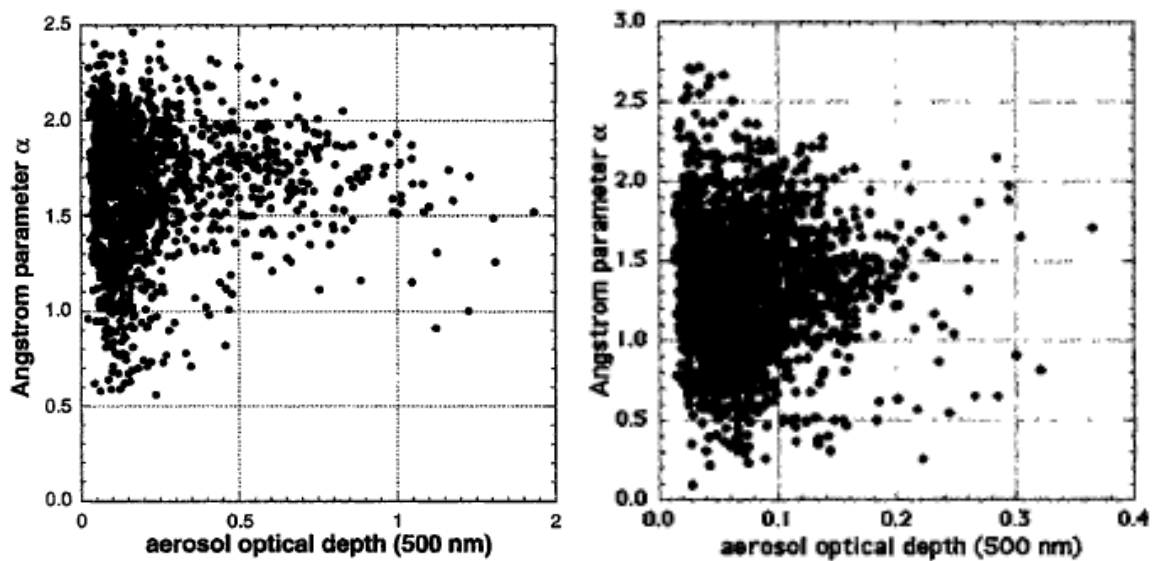


Figura 2-4 Diagramas de dispersión AOT versus AE, a la izquierda la estación del GSFC en Washington, caracterizada por aerosoles urbanos. A la derecha una estación caracterizada por aerosoles continentales ubicada en la ciudad de Sevilleta-Mexico. Ambos tomados de Holben et. al., 2001

La figura 2-4 presentada separadamente por Holben et. al., (2001), refleja el comportamiento de la relación entre el AOT y el AE a 500nm para dos ciudades diferentes caracterizadas por la presencia de aerosoles antropogénicos y de tipo continental. Como se mencionó anteriormente los aerosoles continentales proceden de zonas poco industrializadas, de grandes superficies boscosas, de selvas, etc., mientras que los aerosoles urbanos son comunes en zonas con alto grado de contaminación antropogénica causada por la actividad industrial, las zonas residenciales y el tráfico vehicular.

### 2.2.5 Agua precipitable

El fotómetro Cimel, está dotado con un canal de 940 nm, que le permite determinar el contenido de vapor de agua en la columna atmosférica, al estar ubicado en la banda de absorción de dicho componente.

### 2.2.6 Distribución de tamaños

Tanto el tamaño de los aerosoles como su distribución, son algunas de las propiedades más complejas de los aerosoles atmosféricos, ya que a las medidas de radiancia del cielo se le debe aplicar un algoritmo de inversión como el de Nakajima et al., (1983, 1996) o el desarrollado en AERONET descrito por Dubovik and King, (2000) and Dubovik et al., (2000). En la actualidad AERONET opera con la versión 2 (V2) del algoritmo de inversión, descrito en detalle por Dubovik et al., (2006b).

El código V2, invierte simultáneamente radiancias a todas las longitudes de onda para completar el escenario almucantar o plano Principal (con un ángulo de dispersión  $>2.0^\circ$ ), junto con las mediciones de AOT a las mismas longitudes de onda. Este código también asume que las partículas se clasifican en dos grupos, esféricas y no esféricas, el componente esférico es modelado por un conjunto poli disperso de esferas homogéneas cuyo índice complejo de refracción es igual para todas las partículas de todos los tamaños, mientras que el componente de partículas no esféricas es una mezcla poli dispersa de esferoides homogéneos aleatoriamente orientados. También se asume una atmosfera plano-paralela y una distribución vertical de los aerosoles es considerada homogénea para la inversión del almucantar y bicapa para la inversión de Plano Principal.

La distribución de tamaños de partícula en volumen,  $dV(r)/d\ln(r)$  ( $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ ) se obtiene logarítmicamente a partir de 22 puntos discretos y equidistantes en un rango de tamaños de  $0.05\mu\text{m} \leq r \leq 15\mu\text{m}$ .

### 2.2.7 Albedo de dispersión simple (SSA)

El albedo de dispersión simple es indicativo de la absorción de radiación incidente por parte de los aerosoles. Corresponde a la relación entre los coeficientes de dispersión ( $\sigma_s$ ) y de extinción ( $\sigma_e$ ), siendo este último equivalente a la suma del coeficiente de dispersión

y de absorción ( $\sigma_a$ ). Algunos estudios muestran que el SSA ( $\omega_o$ ) determina el signo del forzamiento radiativo de los aerosoles y por tanto determina el efecto que los aerosoles tienen sobre el clima del planeta (calentamiento o enfriamiento) (Dubovik et al, 2001).

$$\omega_o = \frac{\sigma_s}{\sigma_e} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \sigma_a}$$

## 2.3 Aerosol Robotic Network – AERONET

AERONET (Aerosol Robotic Network), es una federación de redes integrada por AERONET (Estados Unidos) y PHOTONS (Francia), la cual es administrada por la NASA (National Aeronautics and Space Administration), específicamente por el Goddard Space Flight Center (GSFC) y el Laboratorio de Óptica Atmosférica (LOA\_PHOTONS) (CNRS) de la Universidad de Lille. Consiste en una serie de equipos de teledetección, específicamente fotómetros solares basados en tierra, que realizan un monitoreo continuo de aerosoles a lo largo de todo el planeta. Su cobertura espacial se ha ampliado con la ayuda de colaboradores de agencias nacionales, institutos, universidades y científicos en todo el mundo (figura 2-5). Entre sus objetivos principales esta medir las propiedades ópticas de los aerosoles (Holben et al., 1998) para conformar una climatología a nivel global y además sirve de base para la validación de las medidas satelitales de aerosoles atmosféricos.

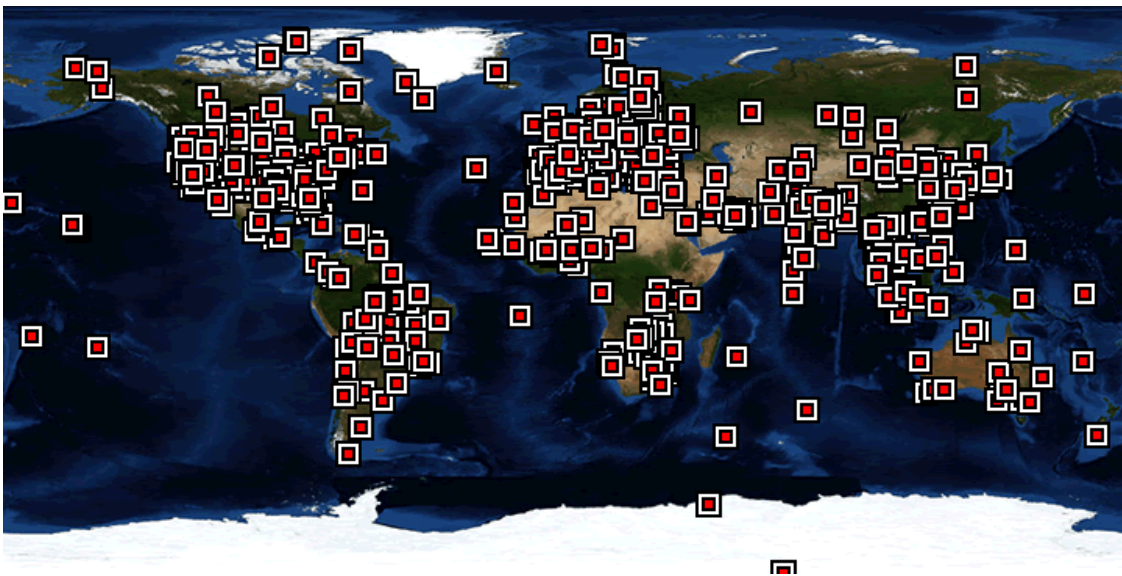


Figura 2-5 Mapa actual de sitios de monitoreo AERONET



Con el fin de garantizar la validez y comparabilidad de los datos obtenidos por la red en sus diferentes puntos dispersos por todo el mundo, la red impone la estandarización de instrumentos, calibración, procesamiento y distribución de datos, los cuales se encuentran disponibles casi en tiempo real en el sitio web: <http://AERONET.gsfc.nasa.gov>. La red ofrece tres productos básicos, la profundidad óptica de aerosoles (AOT), el agua precipitable y un paquete de productos de inversión, cuyos datos están disponibles en tres niveles de calidad, el 1.0, sin depurar las medidas afectadas por nubes y pre-calibración del instrumento; el 1.5, una vez depuradas de nubosidad mediante el procedimiento estándar de la red; y el 2.0, cuando se ha realizado una segunda calibración (post-calibración) al instrumento que asegura la calidad de los datos.

## **2.4 Muestreo y análisis de material particulado**

Con el fin de analizar la concentración y la composición del material particulado suspendido en la atmosfera Bogotana, se planteó un proceso de muestreo que el cual permite obtener muestras de dicho material colectadas en filtros de diferentes materiales y tamaños de poro. Uno de los métodos de muestreo más usados, es el que emplea muestreadores tipo Harvard, también conocidos como impactadores Harvard.

El Impactador Harvard es un equipo que permite coleccionar partículas suspendidas para medir de manera gravimétrica su concentración en el aire, y recibe su nombre debido a que fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Harvard. Puede ser usado para realizar mediciones de calidad del aire tanto en exteriores como en interiores y en cualquier tipo de ambiente, urbano, rural, industrial, etc.

Cuenta con un cabezal que le permite coleccionar partículas menores a 10 micras (PM10), pero también se pueden encontrar cabezales para partículas menores a 2,5 micras (PM2,5) o partículas menores a 1 micra (PM1) los cuales son intercambiables de acuerdo al interés de la medición (figura 2-6). Las partículas son coleccionadas en filtros de 37mm. Es necesario conectarlo a una unidad de bombeo (caracterizada por ser confiable, silenciosa y de flujo estable), que mediante la generación de un vacío hace pasar el aire a través del impactador a razón de 10 litros por minuto. El periodo de exposición de los filtros teóricamente es de 24 horas, o lo más cercano a eso posible, con el fin de que los datos obtenidos sean representativos de periodos diarios.



Figura 2-6 Impactador Harvard

Como se mencionó en la introducción, el material particulado es un contaminante que no tiene un límite de concentración mínimo conocido para ser nocivo, contrario a lo que sucede con los contaminantes gaseosos. Si bien la OMS establece como límites de concentración de PM<sub>10</sub> un promedio anual de 20 µg/m<sup>3</sup> y promedio para las 24 horas de 50 µg/m<sup>3</sup> se sabe que aun estos niveles de concentración son nocivos para la población causando una amplia gama de consecuencias para la salud, pero principalmente afectando los sistemas respiratorio y cardiovascular. Toda la población se ve afectada, pero la susceptibilidad a la contaminación puede variar con la salud o la edad, siendo los niños y los ancianos los más afectados.

La cantidad de material particulado colectado en cada muestra es función del flujo de aire que atraviesa el filtro, así como del tiempo de exposición:

$$\text{Concetración} = \frac{\Delta m}{Q \cdot t}$$

Donde  $\Delta m$  es el cambio en la masa del filtro calculado como la diferencia entre el peso del mismo antes y después del muestreo.  $Q$  es el caudal de aire que pasa a través del impactador y  $t$  es el tiempo de exposición del filtro.

Como lo demuestra la ecuación, todas las variables tienen un fuerte impacto en la concentración de las muestras, pero es la estabilidad del caudal de aire la variable que se debe priorizar, ya que como normalmente en estos sistemas no se cuenta con un registro permanente del flujo, se debe confiar en las mediciones del mismo al inicio y al final del periodo de muestreo de cada muestra para evaluar la cantidad de aire que atravesó el filtro. Una vez colectada la muestra se debe garantizar su conservación en los recipientes adecuados de acuerdo al objetivo de análisis de la muestra.

Los filtros empleados en los procesos de muestreo de material particulado generalmente son de cuarzo, teflón o fibra de vidrio, ya que cada uno de estos sustratos permite recuperar diferentes elementos de las muestras. Por ejemplo, los análisis para compuestos orgánicos se realizan en filtros de cuarzo, ya que este no libera ningún compuesto orgánico conocido. El análisis de las fracciones inorgánicas, tales como los metales se realiza sobre filtros de teflón.

Los análisis de composición se realizan por diferentes técnicas analíticas sofisticadas, como lo es la Thermal Optical Transmittance (TOT) la cual es capaz de determinar fracciones de carbono orgánico y elemental, carbono total y fracciones de carbono soluble e insoluble en agua. En el caso de los iones se emplea la cromatografía iónica (IC) como técnica de análisis. Finalmente, para la determinación de compuestos orgánicos en traza, se aplica la técnica de Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Todos estos análisis se realizan bajo estrictos procedimientos de extracción y acondicionamiento del material de laboratorio y de las muestras a tratar, establecidos por el grupo de investigación del Profesor Jamie Shauer, en el Water Science and Engineering Laboratory y el State Laboratory of Hygiene de la University of Wisconsin – Madison, en los Estados Unidos.

## **3. Materiales y métodos**

### **3.1 Fotómetro solar CIMEL 318**

#### **3.1.1 Descripción**

El instrumento utilizado es un fotómetro de seguimiento solar automático CIMEL, modelo CE318 que permite medir la irradiancia directa y la radiancia difusa del cielo en varios

canales. Determina el estado atmosférico obteniendo medidas del contenido de vapor de agua y ozono de la columna total, así como el contenido y propiedades de los aerosoles.

El instrumento se compone de cuatro partes esenciales (figura 3-1), como son, un sensor (sensor head), un robot de seguimiento (robot base), un colimador (collimator) y una caja de control electrónica (control box). El sensor posee una rueda de 8 filtros, movida por un motor paso a paso, para adquirir bandas espectrales centradas en 1020, 870, 675, 440, 937, 500, 380 y 340 nm. El colimador consiste en un tubo doble de 25 cm de longitud, que proporciona un campo de visión (field of view, FOV) de 1.2°. El conjunto sensor – colimador, es direccionado por un robot de seguimiento, el cual está conformado por dos motores paso a paso, uno azimutal y otro cenital con una precisión de 0,05°. Todo lo anterior opera gracias a una serie de escenarios pre programados en una caja de control electrónica, la cual gestión las diferentes instrucciones de medición a lo largo del periodo de medición, de manera automática o manual, dependiendo de cómo se le configure.

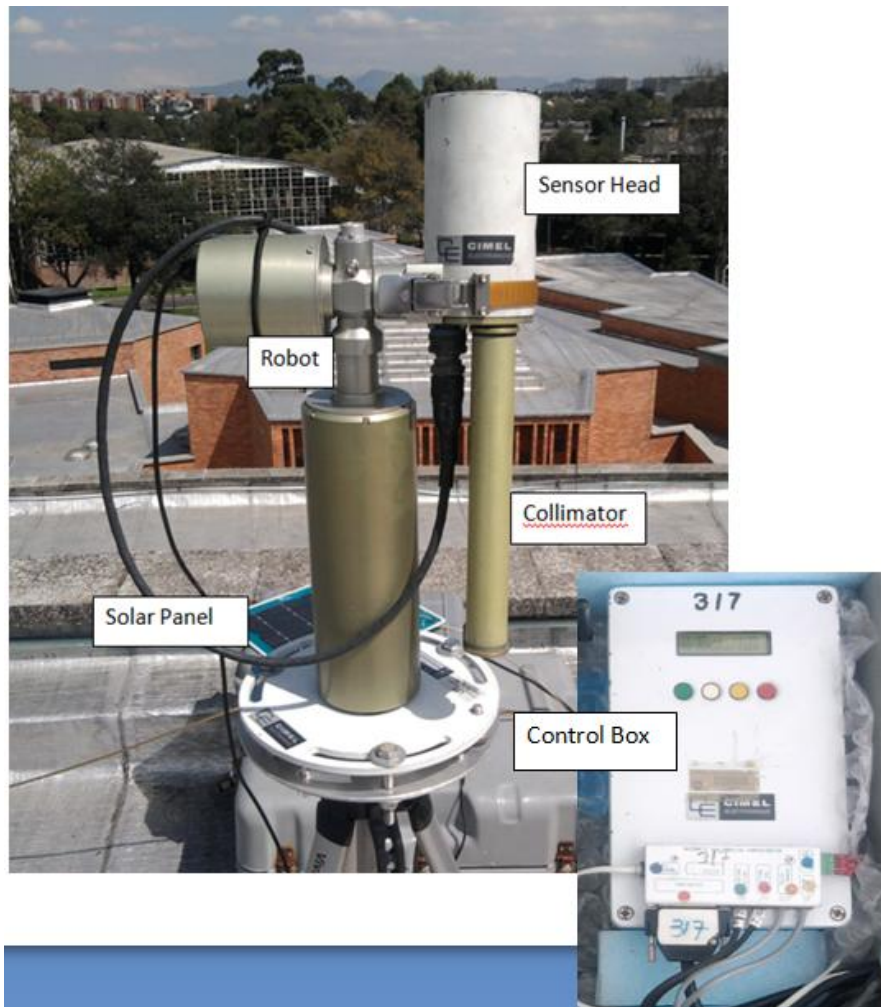


Figura 3-1 Componentes del fotómetro Solar Cimel 318

Adicionalmente el equipo cuenta con una serie de accesorios necesarios para su operación, como lo son, el sensor de humedad que le permite protegerse en caso de lluvia, manteniendo su posición hacia abajo para evitar que ingrese agua al colimador y moje los detectores, dos baterías, la primera de ellas, una batería externa de 12V, con la potencia necesaria para alimentar los dos motores paso a paso del robot, mientras que la segunda batería es interna (6V) y se encuentra dentro de la caja de control electrónico para alimentar dicho elemento. Debido al carácter autónomo y de bajo mantenimiento que caracteriza al fotómetro solar Cimel, este cuenta con un panel solar de 10W o 20W, que permite recargar las baterías del sistema en las horas del día. Finalmente y de forma opcional, para los sitios remotos o sin disponibilidad de una conexión de red, el equipo puede acoplarse a un transmisor satelital para enviar los datos de esta forma.

Como parte del funcionamiento del fotómetro, se tienen pre programados diferentes escenarios, como se les conoce a las secuencias de operaciones del equipo, entre los cuales se registran tres básicos. El primero de ellos es PARK, que consiste en apuntar el instrumento hacia el nadir, a fin de proteger la óptica del mismo en dos condiciones, cuando no se están realizando mediciones para prevenir la entrada de partículas o cualquier otro cuerpo extraño que pueda alterar las mediciones y en caso de lluvia, también para evitar la entrada de agua al colimador.

El segundo escenario es GOSUN, que mediante un algoritmo que con base en las coordenadas de posición geográfica y la hora exacta de la medición, calcula la posición teórica del sol, y se encarga de apuntar el fotómetro hacia dicho punto en el cielo, con una precisión de  $1^\circ$ , a partir de la posición inicial apuntado al nadir, en la que se mantiene el equipo durante el escenario PARK. Inmediatamente termina el escenario GOSUN, se lleva a cabo el tercer escenario, TRACK, que se encarga de realizar el ajuste de la posición con una precisión de  $0,1^\circ$  mediante el uso de un sensor de 4 cuadrantes a partir de esa primera aproximación a la posición del sol realizada por la función GOSUN, y permite que el instrumento realice las mediciones con su máxima precisión en el instante programado.

También se tienen varios escenarios de medición, entre los cuales los se destacan SUN, ALMU y PP. En el primero de estos, SUN, se realizan las mediciones de irradiancia solar (medición directa al sol) en todas las longitudes de onda. Por otra parte, tanto en el escenario ALMU como PP, se realiza la técnica conocida como almucantar y Plano Principal respectivamente, que consisten en medir la radiancia del cielo, en condiciones que serán descritas más adelante.

El fotómetro Cimel está programado para iniciar la operación temprano en la mañana cuando el espesor de masa óptica es aproximadamente 7 y termina al final de la tarde cuando se alcanza una condición similar ( $\sim 7$ ). En estas condiciones, en el amanecer y el atardecer, el fotómetro realiza mediciones directas al sol a intervalos de 0,25 masa óptica, así como de la radiancia del cielo a ángulos de elevación fijos, a lo que se le conoce como la secuencia de Langley. Cuando la masa óptica es pequeña ( $\sim 2$ ) (ángulo cenital menor a  $60^\circ$ ) las mediciones directas al sol se toman cada 15 minutos con un campo de visión de 1,2 grados y las de radiancia del cielo, cada hora, en cuatro bandas espectrales (440, 670, 870 y 1020 nm) a lo largo del plano principal solar (es decir, en ángulo acimutal constante, variando el ángulo de dispersión), hasta nueve veces al día y a lo largo del almucantar solar (ángulo de elevación constante, variando el ángulo acimutal) hasta seis veces al día.

Adicionalmente, el fotómetro tiene una secuencia programada de 3 mediciones directas al sol, a intervalos de 30 segundos para cada longitud de onda conocidas como tripletas. Considerando que la variación temporal de los aerosoles es mucho menor que la de las nubes, la observación de variaciones en las tripletas por encima de 0,02 en espesor óptico, permite identificar mediciones en las que se presenta la interferencia de nubes al momento de la observación directa al sol, y como las mediciones se realizan en intervalos de 15 minutos, se pueden identificar también variaciones de frecuencia más baja. El algoritmo que AERONET emplea para realizar el filtro de nubes, esta descrito en detalle por Smirnov et al., (2000).

### **3.1.2 Procesamiento de datos**

El primer elemento a considerar en el procesamiento de datos, lo constituye la forma en la que dichos datos son transferidos a los servidores de AERONET, ya que existen tres procedimientos diferentes, y todos los fotómetros de la red se subdividen en tres grupos, cada uno de los cuales utiliza un procedimiento diferente.

El primer grupo lo constituyen los fotómetros que envían los datos a 4 satélites de forma automática, empleando la plataforma de colección de datos (DCP por sus siglas en ingles), que se instala como complemento al fotómetro en los sitios remotos, donde no se cuenta con acceso a internet fácilmente.

El segundo grupo, está conformado por los fotómetros que cuentan con el software ASTPWIN de Cimel, que se encarga de recopilar los datos en un PC, y enviarlos a los servidores de AERONET a través de internet de forma automática.

El tercer grupo, requiere de visitas periódicas para descargar los datos y enviarlos manualmente.

Una vez los datos crudos se encuentran en los servidores de AERONET, el primer paso es aplicar un algoritmo, el cual mediante unos coeficientes de calibración, convierte los datos de voltajes digitales en espesor óptico, vapor de agua y radiancia del cielo, en unidades físicas, que a su vez constituyen el nivel 1.0 (sin filtro de nubes) y que están disponibles en el sitio web de AERONET casi en tiempo real (normalmente en menos de dos horas después de la medición).

A partir de los datos nivel 1.0, que como se mencionó anteriormente, son los datos tal como se obtienen de las mediciones, es decir, allí se encuentran absolutamente todos los datos obtenidos por el fotómetro solar durante los periodos de medición que excepto en condiciones de lluvia se extienden desde muy temprano en la mañana y hasta el final del día, con cielos nubados o despejados. Por lo anterior, el volumen de datos manejado en este nivel es muy alto y muchos corresponden a mediciones en diferentes condiciones de nubosidad que no se pueden usar para el cálculo del espesor óptico ni de ninguna de las propiedades de los aerosoles que la técnica permite obtener de la columna atmosférica.

Para generar el nivel 1.5, AERONET aplica un algoritmo para filtrar los datos que presentan interferencias por nubes al momento de la medición directa al sol, el cual realiza varias operaciones, la primera de las cuales es la eliminación de medidas con valores de espesor óptico de aerosoles menores a  $-0.01^1$  (solamente los datos de los canales en los que se da esta condición), por considerarse físicamente imposibles (Smirnov et al., 2000). También se retiran las mediciones tomadas durante la secuencia Langley cuya masa óptica sea superior a 5. A continuación se utilizan las tripletas de datos cuya medición se realizó en intervalos de 30 segundos para toda la rueda de filtros, buscando variaciones de espesor óptico superiores a 0.02, y considerando que la variación temporal de los aerosoles es mucho menor que las de las nubes, estas variaciones indicaran que la medición se llevó a cabo en presencia de nubes. Finalmente existen algunos otros criterios basados en la diferencia en el cambio de los aerosoles respecto a las nubes, que permiten hacer un filtrado de datos contaminados por nubosidad mucho más exhaustivo.

Finalmente, el nivel 1.5 de AERONET, que son los datos sin nubosidad, se utiliza como insumo para obtener los datos de nivel 2.0, mediante una interpolación lineal, entre los coeficientes de pre calibración y pos calibración, estos últimos tomados después del desmontar y enviar el equipo al GSFC para su re calibración. Se debe resaltar que solo los

---

<sup>1</sup> [http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/Documents/Cloud\\_scr.pdf](http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/Documents/Cloud_scr.pdf)

datos de nivel 2.0 tienen la calidad garantizada para ser usados en la investigación científica.

### 3.1.3 Calibración

AERONET cuenta con estrictos protocolos de calibración, que garantizan la calidad y la comparabilidad de los datos de la red en todo el mundo. Los fotómetros Cimel son calibrados antes y después de estar en campo por un periodo de 1 año realizando mediciones. Cuando un fotómetro sale del GSFC hacia su estación de monitoreo, va calibrado y una vez alcanza el año de operación, se desmonta y envía nuevamente al GSFC para su recalibración, siendo remplazado en la estación de monitoreo por otro fotómetro previamente calibrado y el proceso vuelve y se inicia. Esto garantiza que los diferentes equipos están rotando entre estaciones por todo el mundo debidamente etiquetados, evitando así, sesgos por errores específicos asociados a fotómetros puntuales.

Se tienen dos protocolos de calibración, uno para las mediciones solares directas y otro para las mediciones de radiancia del cielo o mediciones indirectas.

Para las mediciones solares directas, se realiza la inter calibración con fotómetros de referencia, los cuales a su vez son calibrados utilizando el método Langley, cada 3 meses, en el Observatorio de Mauna Loa en Hawaii (USA). El método Langley consiste en graficar el logaritmo de los voltajes tomados durante los periodos de medición, contra la masa óptica en el rango comprendido entre 5 y 2, siendo el intercepto de la gráfica el coeficiente de calibración, que corresponde a la señal (voltaje extraterrestre) obtenida de la radiación que llega a la tierra justo antes de ingresar a la atmosfera, y la pendiente de la curva el espesor óptico. Este procedimiento se realiza en observatorios aislados de la mayoría de fuentes locales y regionales de aerosoles, y a gran altitud, como el de Mauna Loa de la NOAA en Hawaii, ya que estos ofrecen un régimen de irradiancia muy estable en las mañanas. Otra ventaja de las estaciones de gran altitud como Mauna Loa, es que se encuentra por encima de la capa de mezcla, donde el contenido de aerosoles y vapor de agua es más bajo y aproximadamente constante lo que garantiza que no se registren atenuaciones asociadas a estos dos elementos.

Para determinar el voltaje extraterrestre, se aplica la ley de Beer-Lambert-Bouguer, que en términos de voltajes se escribe como sigue:

$$V(\lambda) = V_0(\lambda)e^{-m_s\tau}$$



Dónde:

$V_o(\lambda)$  y  $V(\lambda)$  son el voltaje extraterrestre y el voltaje digital medido respectivamente por el fotómetro a la longitud de onda  $\lambda$ .

$m_s$  es la masa óptica de aire.

$\tau$  es el espesor óptico.

Aplicando logaritmos a la ecuación anterior, se obtiene:

$$\ln V(\lambda) = \ln V_o(\lambda) - m_s \tau$$

Aplicando esta última ecuación, se puede construir la gráfica de Langley, cuyo intercepto ( $\ln V_o(\lambda)$ ) como ya se dijo, permite obtener la señal de voltaje extraterrestre ( $V_o(\lambda)$ ) que corresponde a la señal que recibiría el fotómetro justo en la cima de la atmósfera terrestre.

Para calibrar los fotómetros Cimel que operan en los diferentes puntos de la red, al momento en el que estos regresan al GSFC, se someten a un proceso conocido como intercalibración que consiste en realizar mediciones co-localizadas con los dos fotómetros, el de referencia y el que se está recalibrando. Estas mediciones se deben realizar en unas condiciones atmosféricas específicas para garantizar la estabilidad de la atmósfera y minimizar la incertidumbre asociada a este aspecto en el proceso. Dichas condiciones limitan las mediciones a las horas del mediodía con cielos despejados y con un espesor óptico de aerosoles por debajo de 0.3 medido a 440nm. También se debe tener un número importante de mediciones co-localizadas, para mantener estables las relaciones entre los datos tomados por el fotómetro a calibrar y el de referencia.

Mediante la siguiente ecuación se pueden obtener los coeficientes esperados (voltajes) para cada longitud de onda:

$$V_{o-cal}(\lambda) = V_{o-ref}(\lambda) \left( \frac{V_{cal}(\lambda)}{V_{ref}(\lambda)} \right)$$

Dónde:

$V_{o-cal}(\lambda)$  y  $V_{cal}(\lambda)$  corresponden al voltaje extraterrestre y el voltaje digital medido respectivamente para el fotómetro que se está calibrando a la longitud de onda  $\lambda$ .

$V_{O-Ref}(\lambda)$  y  $V_{Ref}(\lambda)$  corresponden al voltaje extraterrestre y el voltaje digital medido respectivamente para el fotómetro de referencia a la longitud de onda  $\lambda$ .

En cuanto a las mediciones solares indirectas o de radiancia, la calibración se lleva a cabo en las instalaciones del GSFC de la NASA utilizando una esfera de integración calibrada. Para el canal de 940nm, que permite obtener el contenido de agua precipitable en la columna atmosférica, la calibración se realiza utilizando una variante del método de Langley. Respecto a la estabilidad a largo plazo de los coeficientes de calibración, los filtros de interferencia óptica son los factores limitantes. Los instrumentos se calibran en una rotación de 6 a 12 meses y los filtros se cambian cuando sea necesario.

### **3.1.4 Productos de observaciones solares directas**

El fotómetro solar Cimel, es capaz de hacer observaciones directamente hacia la posición del sol con una precisión de  $0.1^\circ$  y un campo de visión de  $1.2^\circ$ . Como producto de esas observaciones, se obtienen la proporción en la que los diferentes componentes de la atmosfera atenúan la radiación que llega a la tierra desde el sol, en diferentes longitudes de onda, lo cual a su vez permite conocer el espesor óptico de aerosoles, el exponente de Angstrom que se relaciona directamente con el tamaño de la partículas y el contenido de agua precipitable.

### **3.1.5 Productos de observaciones indirectas (inversión)**

La operación de fotómetro Cimel se basa en tres escenarios principales, el primero es la medición directa al sol que como ya se mencionó, permite obtener el espesor óptico de aerosoles, el contenido de agua precipitable y el exponente de Angstrom, para la columna atmosférica que atraviesa directamente el haz de luz que sale del sol e impacta los detectores del equipo. Los otros dos escenarios, Almucantar y Plano Principal, realizan mediciones de radiancia del cielo en cuatro canales específicamente, 440, 670, 870 y 1020 nm, que sirven de insumo para la aplicación de algoritmos de inversión (Dubovik and King, 2000a; Dubovik et al., 2000b) que permiten obtener información valiosa acerca de otras propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles, tales como la distribución de tamaños, el albedo de dispersión simple, el índice de refracción y la función de fase, entre otras. En

este estudio solo analizaremos la distribución de tamaños y el albedo de dispersión simple.

El Almucantar, consiste en una serie de mediciones que se toman con un ángulo cenital constante igual al ángulo cenital solar, mientras se realiza un barrido por el campo azimutal iniciando en el punto a donde se observa directamente el sol, que se toma como  $0^\circ$  y girando hacia la derecha hasta  $180^\circ$ , luego retoma la posición inicial (apuntando al sol) en  $0^\circ$  y realiza el recorrido en el sentido opuesto otros  $180^\circ$  para completar toda la esfera, como lo muestra la figura 3-2. Este proceso se realiza para cada canal, por lo que la operación completa tarda aproximadamente 5 minutos. Asumiendo la atmosfera homogénea, se pueden considerar como simétricas las mediciones realizadas hacia la derecha y hacia la izquierda, por lo que los datos se pueden promediar antes de someterlos al algoritmo de inversión de AERONET. La rigurosidad con que se llevan a cabo y la exclusividad de este proceso para la realización del Almucantar, contribuye ampliamente a la calidad de los datos obtenidos, sin embargo, es necesario realizar un filtro de nubes al igual que con los datos tomados por observación directa al sol, y para esto se descartan las mediciones de radiancia cuya diferencia entre los dos recorridos, hacia la derecha y hacia la izquierda, superen el 20%.

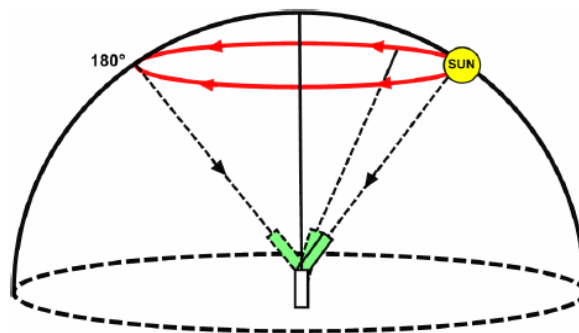


Figura 3-2 Operación del escenario Almucantar

Tomado de CE318 Photometer User's Operation Manual

El escenario Plano Principal, también parte desde la ubicación del sol, y recorre el cielo variando el ángulo cenital mientras el ángulo acimutal (igual al ángulo acimutal solar) se mantiene constante (figura 3-3). Este escenario se inicia después de una medición directa al sol, para ubicar el ángulo acimutal solar y luego inicia las mediciones desde unos  $6^\circ$  por debajo del nivel del sol hasta  $150^\circ$ , el proceso se repite para cada uno de los cuatro canales. La siguiente figura ilustra el proceso de ejecución del escenario Plano Principal.

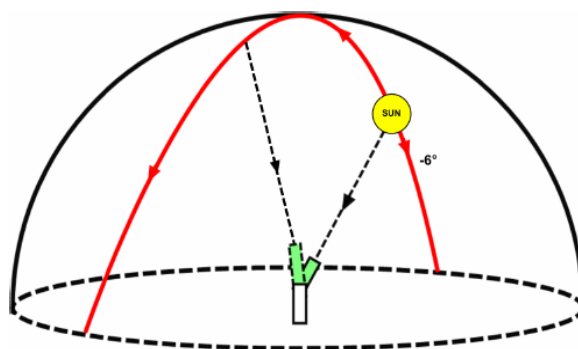


Figura 3-3 Operación del escenario Plano Principal.

Tomado de CE318 Photometer User's Operation Manual

En la siguiente tabla, se muestran los ángulos de observación para los dos escenarios anteriores.

Tipo de medición	Angulo de observación													
	0°	2.0°	2.5°	3.0°	3.5°	4.0°	4.5°	5.0°	6.0°	6.0°	8.0°	10.0°	12.0°	14.0°
Almucantar	16.0°	18.0°	20.0°	25.0°	30.0°	35.0°	40.0°	45.0°	50.0°	60.0°	70.0°			
	80.0°	90.0°	100.0°	110.0°	120.0°	130.0°	140.0°	160.0°	180.0°					
Plano Principal	0°	-6.0°	-5.0°	-4.5°	-4.0°	-3.5°	-2.5°	-2.0°	2.0°	2.5°	3.0°	3.5°	4.0°	
	4.5°	5.0°	6.0°	6.0°	8.0°	10.0°	12.0°	14.0°	16.0°	18.0°	20.0°	25.0°		
	30.0°	35.0°	40.0°	45.0°	50.0°	60.0°	70.0°	80.0°	90.0°	100.0°	110.0°			
	120.0°	130.0°	140.0°											

### 3.2 Desarrollo de equipos

#### 3.2.1 Soporte para fotómetro solar AERONET

Para garantizar el correcto funcionamiento del fotómetro AERONET y garantizar la confiabilidad de sus mediciones, fue necesario analizar cuáles eran los factores asociados a las condiciones de intemperie en las que debe operar el equipo, que podrían afectar su

desempeñó. Variables meteorológicas como la temperatura, la velocidad del viento y la lluvia, así como la posibilidad de interferencias por parte de insectos o aves, fueron consideradas a la hora de seleccionar el material y el diseño del soporte para el fotómetro.

Teniendo en cuenta que el interés del proyecto es instalar los equipos en zonas urbanas representativas de buena parte de la ciudad, como por ejemplo dentro o en los alrededores del campus de la Universidad Nacional de Colombia, se tuvo que escoger una edificación elevada (superior o por lo menos igual a las edificaciones circundantes) con el fin de evitar posibles interferencias con construcciones aledañas al sitio. Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando los fuertes vientos que se registran en Bogotá en algunas épocas del año, se determinó que el soporte debería ser robusto, firme y ligero, adicionalmente, para poder ganar algo de altura sobre la terraza, en caso de que esta presentara algún obstáculo adicional (p. e. barandas o rejas), se estableció que el soporte debería permitir instalar el fotómetro a más de 80 cm del suelo, lo cual implicaría un centro de gravedad elevado para el conjunto, teniendo en cuenta los 15 kilogramos de peso del fotómetro, por lo que se hacía aún más importante que el diseño del soporte cumpliera con las características de firmeza y ligereza antes mencionadas, pero además debía ser fácilmente transportable hasta sitios de difícil acceso.

Se escogió el dura aluminio como material de construcción para el soporte, debido a que es ligero, resistente a esfuerzos mecánicos y a la corrosión. Una vez seleccionado el material, lo siguiente era establecer la posible forma del soporte, y se escogió hacer un trípode, debido a lo versátil de su operación, a los múltiples usos que tiene y a la practicidad que presenta a la hora de ser transportado.

Para establecer el diseño final del soporte, se evaluaron diferentes trípodes comerciales, los cuales no cumplieron con las expectativas del proyecto, por lo que se decidió desarrollar un trípode, desarmable, que permita configurarlo en diferentes alturas, que se adapte a suelos irregulares, y que no presente vibraciones con el viento o la operación propia del equipo. Para esto, se contó con la asesoría técnica de FABRIN®, una empresa colombiana del sector metalmecánico, a quienes se le presentaron algunos diseños opcionales, y finalmente se escogió la configuración que se describe a continuación.

El trípode consta de patas divididas en 3 secciones, cuyos tamaños aumentan progresivamente. Cada una de las secciones cuenta con una rosca tipo hembra y otra tipo macho, que permite ensamblarlas de acuerdo a la necesidad del sitio de monitoreo. Cuenta con un eje central, también divisible en 2 secciones y que cuenta con un gacho en la parte inferior, para adicionar peso al soporte y de esta forma, bajar la altura del centro de gravedad del conjunto Trípode-Fotómetro. Adicionalmente, de este eje, se desprende 3 templetes, graduables en altura y extensión, hacia las patas del trípode, lo cual permite

ajustarlo y ubicar su plataforma a nivel, independientemente de si el suelo esta nivelado o no. Finalmente, las 3 patas y el eje central convergen en un pivote que sirve de soporte para la plataforma del fotómetro y que permite acoplar y desacoplar todas las partes antes mencionadas (figura 3-4).



Figura 3-4 Trípode construido específicamente para el fotómetro AERONET

Cabe destacar, que después de su construcción, se realizaron pruebas con el equipo en todas las posibles configuraciones que permite el diseño del trípode, obteniendo excelentes resultados en todos los casos, ya que incluso en su configuración de más altura y bajo condiciones de fuertes vientos, el fotómetro no se ve afectado por vibraciones ni movimientos asociados a los cambios en la velocidad y dirección de los movimientos propios de la operación del equipo (figura 3-5).



Figura 3-5 Fotómetro Solar Cimel #317 en operación

### 3.2.2 Unidades para muestreo de material particulado PM10

Al igual que en el caso del fotómetro solar, los impactadores de PM10 deben operar en condiciones de intemperie, lo cual para el impactador en sí no constituye un problema, debido a que está construido de metal, resistente a la corrosión y no posee partes eléctricas ni electrónicas. Sin embargo, el impactador solo es una parte de la unidad de muestreo, que incluye una bomba de vacío, la cual si es eléctrica y por tanto debe ser protegida de los elementos, especialmente de la lluvia. Adicionalmente, se debe brindar soporte al impactador a una altura mínima sobre el suelo. Por lo anterior y ante la inexistencia en el mercado de una unidad con las características requeridas por el proyecto, se decidió diseñar la unidad de muestreo, a partir de elementos para instalaciones eléctricas a la intemperie y materiales ligeros no susceptibles a la corrosión

como el aluminio, para proteger los elementos eléctricos de cada unidad, así como para sostener el impactador a la altura requerida y alejado de cualquier posible interferencia al flujo de aire.

La base para el diseño de las unidades de muestreo de material particulado, fue un cofre de tipo eléctrico para intemperie, capaz de albergar los diferentes elementos del equipo que requieren estar a salvo del sol y la lluvia. A estos cofres se les adecuaron patas de aluminio para separarlos del suelo en caso de inundación del sitio de muestreo y para aumentar su estabilidad, debido a que ellos mismos soportan los impactadores a casi 2 metros de altura sobre el suelo. También se adecuaron unas placas metálicas al respaldo de los cofres, que sirven de soporte para el mástil de aluminio, el cual cuenta con un brazo horizontal de unos 50 cm en su extremo superior, que se encarga de sostener el impactador de PM10 durante el muestreo. Este mástil también constituye un ducto por donde pasa la tubería de vacío tipo Tygon, que comunica la bomba con el impactador.

En cuanto a la unidad de potencia, se escogieron bombas de vacío de doble diafragma sin lubricación y libres de mantenimiento, teniendo en cuenta que los equipos están programados para operar durante 23,5 horas diarias en promedio, durante la campaña de muestreo. Este tipo de bombas se escogió por la confiabilidad en la operación que brindan y porque al ser de doble diafragma, su razón de flujo es muy estable. Sin embargo, como cualquier equipo eléctrico con partes móviles, estas se calientan de forma importante, y considerando que debían estar completamente encerradas para evitar que la humedad las afectara, fue necesario acondicionar los cofres eléctricos para que se dé una circulación forzada de aire al interior de los mismos, que refrigere las bombas sin alterar sus condiciones de operación, por lo que se instalaron un ventilador y un extractor de aire en las paredes laterales del cofre, a diferentes alturas como se muestra en la figura 3-6.

Finalmente, al interior del cofre se instalaron elementos de conexión y protección eléctrica, se fijaron las bombas a la estructura de la caja y se instalaron válvulas tipo aguja, para regular el flujo de aire succionado por la bomba y que pasa a través del filtro dispuesto en el impactador de PM10.

El sistema diseñado y construido, permite la remoción del impactador de forma fácil y sin necesidad de herramientas, lo cual es necesario, teniendo en cuenta las condiciones de difícil acceso que presentan la mayoría de sitios donde este tipo de equipos se instala, como se ve en la figura 3-7. Remover el impactador es necesario, porque el proceso de instalación y recuperación del filtro se debe hacer en las condiciones más controladas posibles, para evitar la contaminación del mismo, entre otras razones, por una mala



manipulación, una caída, contacto con superficies contaminadas, pérdida del material del filtro, etc.



Figura 3-6 Unidades de muestreo de material particulado PM10



Figura 3-7 Estación de monitoreo Parque Simón Bolívar (PSB) de la RMCAB

### 3.3 Caracterización de Aerosoles por Sensado Remoto y medición In situ en Bogotá –CASERIBO

De acuerdo con lo reportado recientemente por la Organización Mundial de la Salud (OMS), Bogotá es la sexta ciudad más contaminada por material particulado menor a 10 micrómetros (PM10) en América Latina. Las concentraciones anuales de PM10 en Bogotá son casi 4 veces más altas que el valor máximo recomendado por la OMS. Según un estudio epidemiológico reciente, el PM10 es responsable del 75% del incremento de disfunciones respiratorias en preescolares en Bogotá. El estudio del material particulado cualquier como contaminante atmosférico reviste una gran complejidad asociada a sus características, lo cual lo hace mucho más difícil de analizar que cualquiera de los contaminantes en fase gaseosa. Para su completa caracterización, y para la evaluación de sus efectos en la salud pública, la contaminación por material particulado requiere de la medición no solo de la concentración sino también de la composición y de la distribución de tamaño de partícula. Si bien la calidad del aire en Bogotá ha sido probablemente la más

investigada en Colombia, aún es muy poco lo que se sabe sobre la composición del material particulado y menos aún sobre la distribución de tamaño de partícula.

Con el fin de reducir la incertidumbre asociada a la falta de información sobre estas variables, se desarrolló el proyecto CASERIBO (Caracterización de Aerosoles por Sensado Remoto y medición In situ en Bogotá), en la cual, mediante el diseño y la implementación de una campaña de muestreo de material particulado y de monitoreo de aerosoles atmosféricos, se trató de conectar dos métodos diferentes para el estudio de la contaminación atmosférica por material particulado.

Para esto, se evaluaron las características del material particulado a nivel local, realizando toma de muestras in situ, que posteriormente se sometieron a diversos análisis para establecer su composición química. Este proceso permite caracterizar los contaminantes, pero sus resultados son esencialmente de escala local. La otra técnica que se implementó para estudiar las características de las partículas suspendidas en la atmosfera fue la fotometría solar que como ya se describió ampliamente en este documento se realiza con el apoyo de la red AERONET en el marco del proyecto AERONET - Colombia - *Exploratory and long-term aerosol remote sensing in the Tropical Andes*.

Para la ejecución del proyecto, se contó con la cooperación del Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA, que es la entidad que desarrollo y actualmente gestiona y administra la red AERONET, y The University of Wisconsin – Madison que cuenta con algunos de los mejores investigadores a nivel mundial en temas referentes a contaminación atmosférica por material particulado.

### **3.3.1 Selección de sitios de muestreo y monitoreo**

Dadas las condiciones técnicas y logísticas que se requieren para llevar a cabo tanto el proceso de muestreo de material particulado como el monitoreo por fotometría solar, fue necesario evaluar diferentes sitios para la instalación de los equipos, de forma tal que se presente la menor interferencia posible de factores externos en ambos procesos.

Como parte del proceso de selección del sitio de monitoreo, se establecieron diferentes criterios que permitieran seleccionar entre las diferentes opciones la más favorable para el proceso. Entre los criterios evaluados, se encontraban aspectos de tipo logístico, como las condiciones de acceso y de seguridad, así como aspectos netamente técnicos, como la altura del sitio sobre el nivel del suelo, la exposición a fuentes importantes de aerosoles atmosféricos, como vías principales, industrias, etc.

Dadas las pocas opciones que se tenían para establecer el sitio de monitoreo, y sus condiciones de difícil accesibilidad fue necesario seleccionar un sitio diferente pero cercano para la estación de muestreo de material particulado. Para instalar el fotómetro AERONET, se evaluaron diferentes edificios al interior del campus de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, específicamente los que contaran con una terraza elevada, sin obstáculos a los costados del sitio de instalación y con suministro eléctrico y la posibilidad de contar con una conexión a internet para la transmisión de los datos desde el fotómetro hacia los servidores AERONET. Se evaluaron edificios como el del Departamento de Química, El Instituto de Extensión e Investigación IEI, El Departamento de Matemáticas y La Facultad de Economía, siendo este último el que presentaba las condiciones óptimas para la campaña, además de la cooperación de la administración del edificio y del decano de la Facultad. Por lo anterior, las primeras mediciones fotométrías realizadas en Bogotá y en Colombia, se realizaron desde este edificio de la Universidad Nacional de Colombia. Infortunadamente por circunstancias ajenas al proyecto y a la Facultad de Economía fue necesario retirar el equipo del edificio y del campus para poder mantener su operación, ya que por tratarse de la primera instalación que se hacía se requería una supervisión constante para garantizar su operación óptima. La opción para el traslado del equipo fue un edificio aledaño a la universidad a unos 650m aproximadamente del edificio de Economía, conocido como el CUBO, ya que allí se contaba con la altura y las características necesarias para llevar a cabo las mediciones, además de estar muy cerca del sitio óptimo para el muestreo de material particulado, aproximadamente a unos 1800 metros.

El último sitio mencionado, corresponde a la estación de monitoreo del Parque Simón Bolívar (PSB), ubicada al interior del Centro de Alto Rendimiento de Coldeportes.

Para realizar el muestreo de material particulado se buscaba un sitio que fuera representativo de las condiciones atmosféricas promedio de la ciudad, además de que contara con los demás aspectos logísticos y técnicos que se describieron previamente. Para esto, se evaluaron diferentes estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá RMCAB, teniendo en cuenta, que estas tienen como uno de sus propósitos el muestreo de material particulado, además cuentan con las condiciones técnicas que garantizan el óptimo desarrollo de la campaña. Se evaluaron las estaciones: PSB, Kennedy, y Fontibon, considerando principalmente la representatividad que tienen desde el punto de vista atmosférico para la ciudad en general, asociada a su ubicación cerca de vías principales, vías en mal estado (sin pavimento), cerca de industrias o alguna otra fuente potencial de material particulado. También se consideró su altura, nivel de exposición, seguridad, entre otros aspectos. Finalmente se decidió instalar el sitio de muestreo en la estación PSB (Parque Simón Bolívar), debido a que se encuentra en una

zona verde dedicada a la práctica deportes y alejada de vías principales e industrias que interfieran con la calidad de las muestras (figura 3-8).

Finalmente, los sitios de monitoreo AERONET fueron:

- Edificio Facultad de Economía Universidad Nacional de Colombia (N 4°38'12.8" – W 74°04'53.8"). Para las observaciones realizadas en 2012.
- Edificio EL CUBO Colsubsidio (N 4°38'32.9" – W 74°04'47.1"). Toda la campaña en 2013.

Y para el muestreo de material particulado:

- Estación Parque Simón Bolívar (PSB) de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) ubicada en el Centro de Alto Rendimiento de Coldeportes (N 4°39'30.5" – W 74°05'02.4")

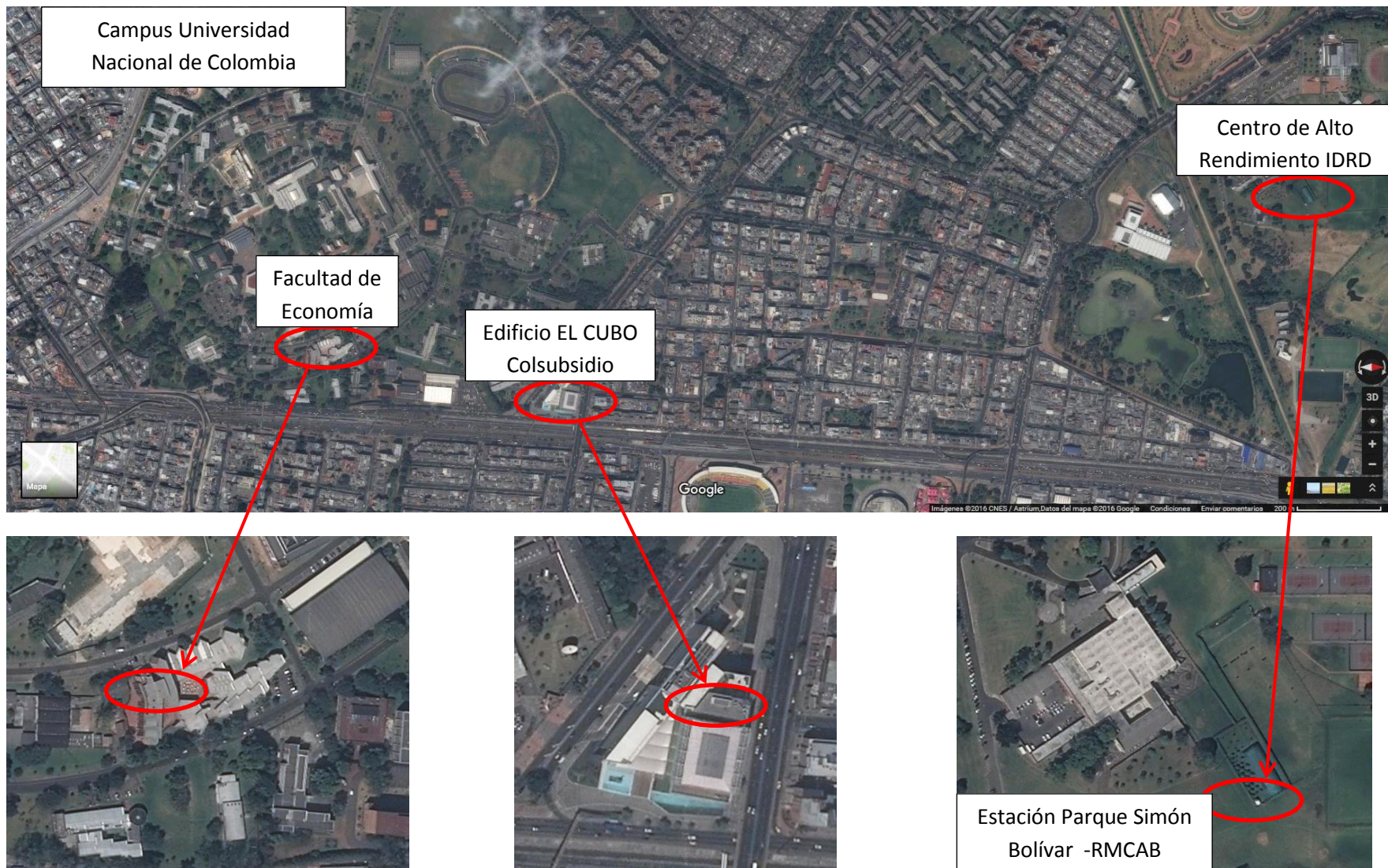


Figura 3-8 Sitios de Monitoreo AERONET y Muestreo CASERIBO

### 3.3.2 Muestreo y análisis de composición de PM10

Para llevar a cabo el muestreo de material particulado, se desarrollaron protocolos que garantizaban la repetitividad del proceso.

El ciclo de muestreo se programó entre las 13:50 y la 13:20 del día siguiente, con el fin de minimizar el tiempo de interrupción del mismo. Cuando el ciclo se interrumpe se procede a la recuperación del filtro con la muestra colectada y a la instalación de un nuevo filtro. Las muestras colectadas se conservaron en cajas de petri plásticas, selladas con cinta teflón, para evitar cualquier tipo de contaminación o la pérdida de componentes volátiles presentes en el filtro.

Se trabajó con dos tipos de sustrato, teflón y cuarzo considerando la viabilidad que estos deberían brindar para realizar los análisis que se planeaban hacer en la UWM, los cuales en el caso de los filtros de cuarzo eran sometidos a un proceso de calcinación previa al pesaje inicial, con el fin de eliminar las trazas de carbono orgánico que pudiesen estar presentes en ellos, para garantizar que la muestra no presentara tal interferencia a la hora de realizar análisis que busquen identificar y cuantificar este elemento. Se realizaron pesajes por triplicado antes y después del muestreo, previa adaptación de los filtros a condiciones de humedad conocidas, con el fin de evitar errores en las mediciones asociados a la presencia de la misma en la muestra o en el filtro nuevo.

Como ya se mencionó, se emplearon filtros de teflón y cuarzo, de 37 mm, los cuales brindaban una área expuesta para la colección de la muestra de  $7.07 \text{ cm}^2$ , dispuestos en impactadores tipo Harvard para material particulado menor a 10 micrómetros (PM10), conectados a bombas de vacío de doble diafragma, operando a un régimen de flujo de 10 L/min aproximadamente. Durante el proceso de muestreo, se midieron los flujos inicial y final de cada ciclo, con el fin de establecer el volumen de aire muestreado y la estabilidad de flujo durante el periodo de recolección de cada muestra. A lo largo de toda la campaña se operó con cuatro unidades de muestreo, dos con filtros de teflón y los otros dos con cuarzo. El proceso de pesaje de los filtros y las muestras se realizó en una microbalanza.

Cabe resaltar que durante el periodo de muestreo de PM10 se realizaron simultáneamente otras labores propias de la parte experimental del proyecto CASERIBO, algunas de las cual, ya se venían desarrollando como parte del proyecto AERONET – Colombia y otras se desarrollaron durante un periodo corto o posterior al muestreo, como es el caso del análisis de composición, el cual se desarrolló desde aproximadamente la mitad del periodo de muestreo hasta tiempo después de haberse terminado dicha

campana. En la siguiente figura se muestra el cronograma de actividades desarrolladas, de las cuales los productos se analizan y reporta en el presente documento.

2013	MARZO			ABRIL				MAYO				JUNIO				JULIO				AGOSTO				SEPT				OCTUBRE					
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
Fotometría Solar																																	
Muestreo de PM10																																	
Datos Meteorología																																	
Monitoreo (Beta) RMCAB de PM10																																	
Monitoreo (Beta) RMCAB de PM2,5																																	
Monitoreo (Grimm) PRODYCON																																	
Análisis de composición de PM10																																	

Figura 3-9 Cronograma de campaña CASERIBO

El análisis de las muestras de material particulado, se realizó en el Water Science and Engineering Laboratory de la University of Wisconsin – Madison. Con la técnica Thermal Optical Transmittance (TOT) se determinó las fracciones de carbono orgánico y elemental en las muestras colectadas sobre filtros de cuarzo, al igual que para la determinación de iones, la cual se realizó empleando la técnica de cromatografía iónica (IC). Ambos análisis se realizaron siguiendo los procedimientos del Water Science and Engineering Laboratory de University of Wisconsin – Madison. Adicionalmente se realizaron análisis de Organic Tracers, para determinar trazas de compuestos orgánicos volátiles, siguiendo los protocolos del Water Science and Engineering Laboratory para la extracción del material particulado colectado en las muestras y aplicando la técnica de Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) en las instalaciones y siguiendo los procedimientos del Wisconsin State Laboratory of Hygiene de la University of Wisconsin – Madison.

Tal como lo muestra el cronograma de actividades anteriormente presentado, de la mano del muestreo de PM10 y del monitoreo fotométrico, se desarrollaron otras mediciones de material particulado, las cuales fueron realizadas por la Secretaria Distrital de Ambiente



(SDA) y por PRODYCON. La SDA a través de su estación PSB de la Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB), cuenta con equipos tipo Beta, capaces de medir PM10 y PM2.5 esencialmente de forma continua. Por su parte, PRODYCON es una empresa de consultoría ambiental con intereses científicos, la cual cuenta con una serie de vehículos dotados de instrumentos para realizar mediciones de calidad del aire, en este caso específico, se empleó un equipo tipo Grimm, el cual puede medir PM10, PM2.5 y PM1 también de forma continua. Los resultados de estas dos entidades, nos permitieron validar nuestras mediciones gravimétricas y analizar las relaciones entre las diferentes fracciones de PMx que no podíamos hacer a partir de nuestras muestras. Cabe destacar que con contadas excepciones las dos mediciones tuvieron muy buena correlación, lo cual demuestra la confiabilidad del método.

## **4. Resultados, análisis y discusión**

### **4.1 Cobertura nubosa y potencial de la fotometría en Bogotá como técnica de monitoreo**

Como se mencionó previamente, la fotometría solar es una técnica limitada a las horas del día y a los momentos con cielos despejados, lo cual limita su utilidad de acuerdo a las condiciones meteorológicas y climáticas del sitio donde se realice el monitoreo. Si bien el fotómetro Cimel opera todo el día, independientemente de si el cielo está nublado o no, deteniéndose únicamente cuando la posición teórica del sol está por debajo del horizonte o cuando se detectan lluvias, independientemente de su intensidad, el volumen de datos es muy grande en el nivel 1.0, sin embargo, cuando AERONET aplica los algoritmos para filtrar las mediciones contaminadas por la presencia de nubes, el número de datos se reduce ampliamente.

Históricamente en Bogotá el cielo normalmente permanece nublado la mayor parte del año, pero en los últimos años esta condición ha venido cambiando, al punto de que se tienen días enteros con cielos totalmente despejados o con la presencia de nubes aisladas, que permiten la operación del fotómetro y la recolección de datos importantes, que permiten entender cómo están distribuidos los aerosoles en la atmosfera Bogotana en un día soleado. Por otra parte, la mayor parte del año, los días con cielos despejados, así sea por momentos son una eventualidad, lo que dificulta el uso de técnicas de sensado remoto como la fotometría o la observación satelital para caracterizar la atmosfera o como técnica para el estudio y la vigilancia de la calidad del aire en Bogotá.

### 4.1.1 Análisis de captura de datos

Entre el 18 de marzo y el 19 de septiembre de 2013 se realizó la primera campaña de monitoreo de aerosoles por fotometría solar en Bogotá, con el apoyo de la red AERONET, como se describió anteriormente, la cual permitió obtener la base de datos que se analizara a continuación y que permitirá evaluar aspectos como la viabilidad de estudiar la contaminación atmosférica en Bogotá empleando técnicas de sensado remoto como la fotometría solar.

Inicialmente el volumen de datos nivel 1.0, era bastante bueno, y se contaba con cerca de 1500 mediciones en el periodo de observación, pero teniendo en cuenta las características de estos datos y las condiciones meteorológicas de la ciudad, es entendible que al pasar por el filtro de nubes se pierdan más de la mitad de las mediciones como sucede al revisar los datos nivel 1.5.

Cuando se realizó el proceso de recalibración que permite garantizar la calidad de los datos, y referenciarlos como nivel 2.0, se aplicaron algoritmos que se describieron anteriormente, y que redujo la serie temporal entre un 10 y un 20 % más, lo que nos permite analizar diferentes aspectos acerca de la influencia de la meteorología Bogotana en las mediciones fotométricas y la viabilidad de establecer esta técnica como una alternativa para vigilar la calidad del aire en la ciudad.

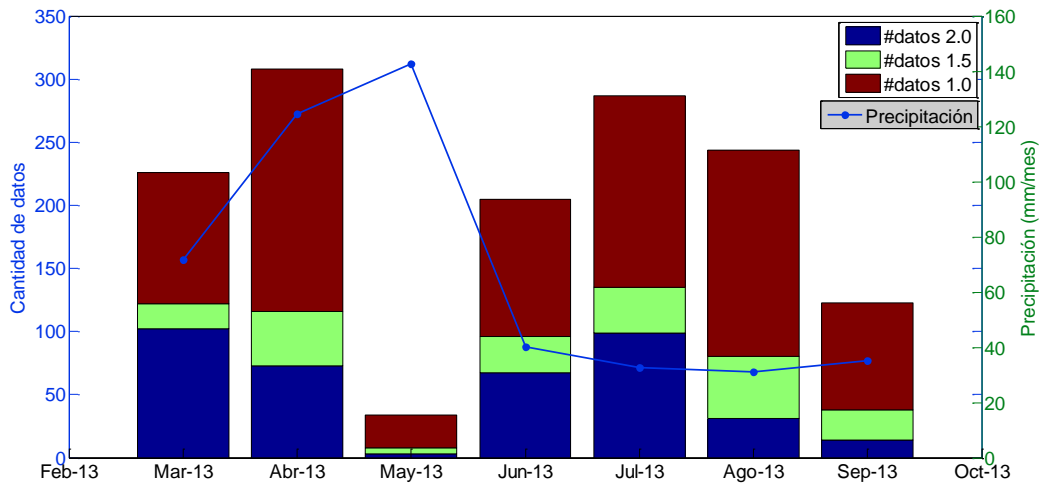


Figura 4-1 Comparación del volumen de datos en los tres niveles de calidad AERONET y su relación con la precipitación mensual. Las series #datos\_1.0\* y #datos\_1.5\* corresponden a la cantidad de datos que no logro ascender de nivel. La altura total de la columna corresponde a la cantidad total de datos nivel 1.0 para cada mes.

La figura 4-1, muestra la distribución mensual de las mediciones (número total de mediciones al mes) y la reducción que sufren las series de datos a medida que se someten a los algoritmos que garantizan la calidad de los mismos, desde el nivel 1.0, “*datos brutos*” hasta el 2.0, que cuentan con la calidad necesaria para ser usados en investigación científica. Se puede observar, con excepción del mes de mayo, que no cuenta con un volumen de datos comparable a los demás meses (debido a problemas técnicos con el equipo, específicamente con el sistema de carga de las baterías), que al pasar del nivel 1.0 al 2.0 se pierden entre el 55 y 89% de los datos y tal pérdida no se distribuye uniformemente a lo largo del periodo de medición, por lo que se trató de establecer una correlación entre los factores meteorológicos y los días con pocas o ninguna medición.

Si se analizan los datos meteorológicos para los meses de la campaña, se puede observar una tendencia relativamente similar entre el número de datos nivel 1.5 tomados por el fotómetro y el promedio mensual de radiación solar global, y teniendo en cuenta que estos datos son los que superan el filtro de nubes, se logra entender la diferencia entre las tendencias de los datos 1.0 y 1.5. Adicionalmente, otra de las variables meteorológicas que nos permite entender el comportamiento de las series temporales de datos AERONET es la precipitación promedio mensual, que tal como se muestra en la figura 4-4, es coherente con la tendencia de la radiación solar promedio (figura 4-2), pero no con la cantidad de datos tomados sobre todo en los meses de marzo y abril. Para entender esto es necesario evaluar la enorme variabilidad de los datos de precipitación sobre todo en estos dos meses y en mayo. La figura 4-3 muestra la variabilidad de los promedios diarios a lo largo del periodo de medición y se puede observar que especialmente para los primeros tres meses se tiene un gran número de días con bajas precipitaciones, pero también se dan episodios en los que la precipitación es muy alta, lo cual es común en Bogotá, donde suelen ocurrir aleatoriamente estos aguaceros durante los periodos más lluviosos del año.

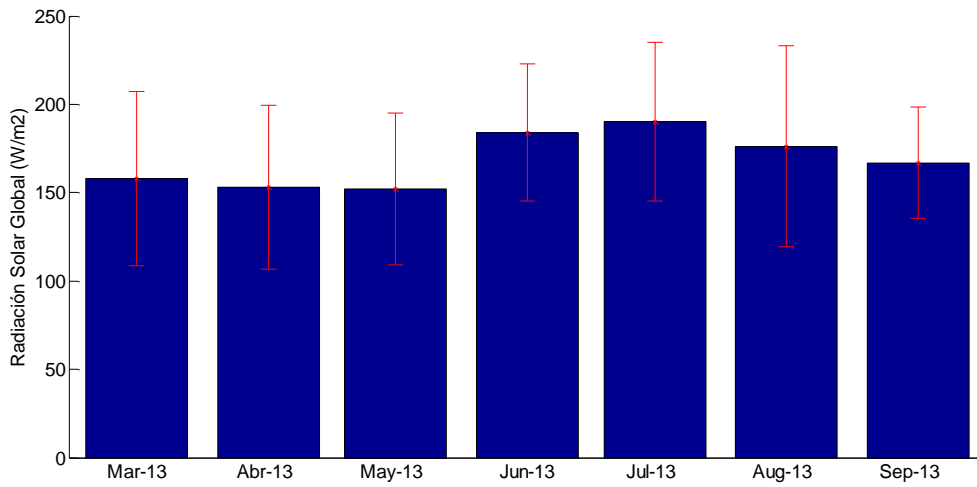


Figura 4-2 Promedio mensual de Radiación solar global para el periodo de observación

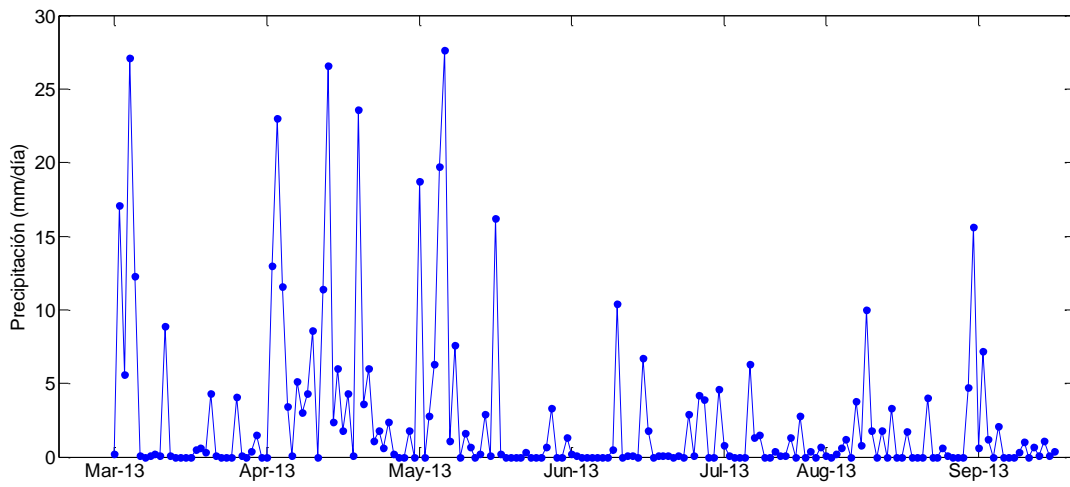


Figura 4-3 Precipitación diaria para el periodo de observación

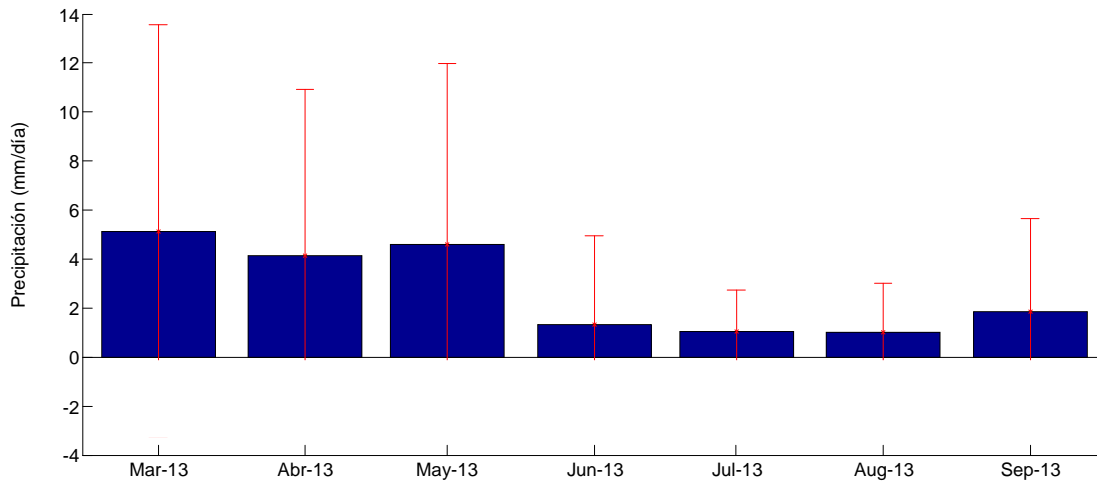


Figura 4-4 Promedio diario de precipitación para cada mes del periodo de observación

## 4.2 Análisis de mediciones solares directas

### 4.2.1 Espesor óptico de Aerosoles (AOT)

Las series de AOT para todas las longitudes de onda presentan una variabilidad bastante alta, pese a que se mueven en un intervalo de AOT relativamente pequeño, de 0 a 0,4 en el caso más amplio que se da para las longitudes de onda más pequeñas. El AOT a 500 nm es uno de los parámetros obtenidos por fotometría más analizados, debido a que algunos instrumentos satelitales realizan mediciones en dicha longitud de onda o en longitudes muy cercanas, por lo que la mayoría de los análisis se centraron en dicha longitud de onda y la figura 4-5 muestra la variabilidad diaria de las mediciones.

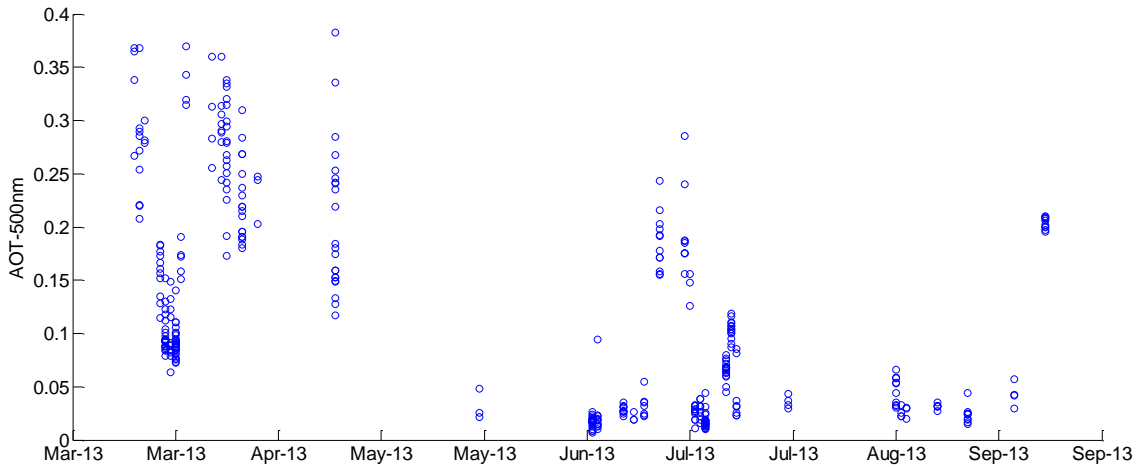


Figura 4-5 Dispersión diaria del AOT a 500nm

El comportamiento de las series temporales de AOT registradas durante la campaña de medición, muestran una gran variabilidad en los meses de marzo y abril, la cual sufre una reducción importante hasta el mes de septiembre, donde sus valores se vuelven a incrementar ampliamente (Figura 4-6). Esta variabilidad se da sobre todo para las longitudes de onda más grandes (1020, 870 y 675nm), lo cual puede estar asociado a la complejidad de la mezcla de partículas que componen los aerosoles en la ciudad, así como la composición de la fase gaseosa de la estratosfera, ambas como consecuencia de la gran variedad de fuentes de emisión y de las condiciones climáticas que para estos meses fueron bastante diferentes a los meses posteriores.

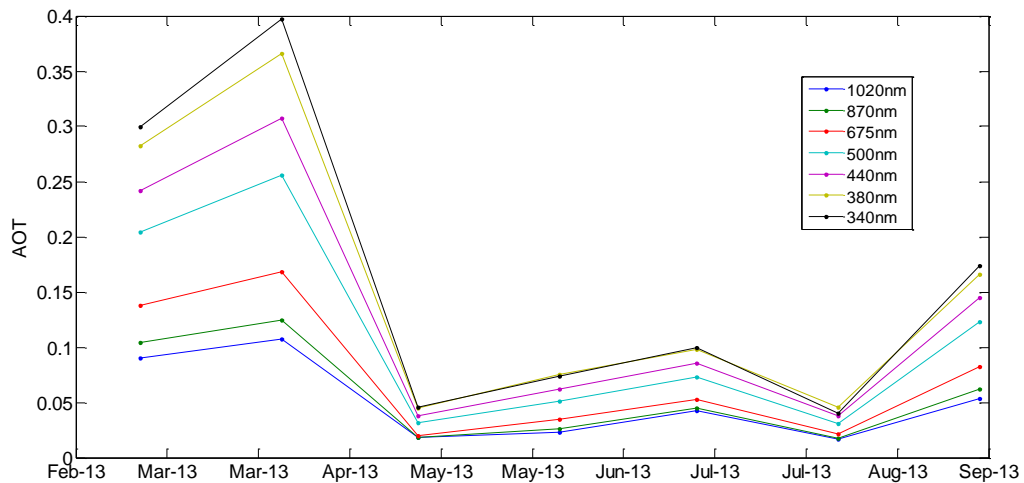


Figura 4-6 Promedios mensuales de AOT

Un análisis del AOT a todas las longitudes de onda, pero comparando el cambio que sufre cada uno, respecto a un valor base como el AOT a 1020nm (figura 4-7), permite apreciar que la composición de las masas de aire es esencialmente la misma a lo largo de todo el periodo de medición. Sin embargo, para las partículas más pequeñas, cuyo comportamiento se asocia con la longitud de onda 340 nm, si se observan cambios en la tendencia, indicando una reducción en las partículas más finas durante los meses de mayo a agosto, lo cual podría estar relacionado con la actividad de la ciudad y el clima seco que se presentó durante esta época del año.

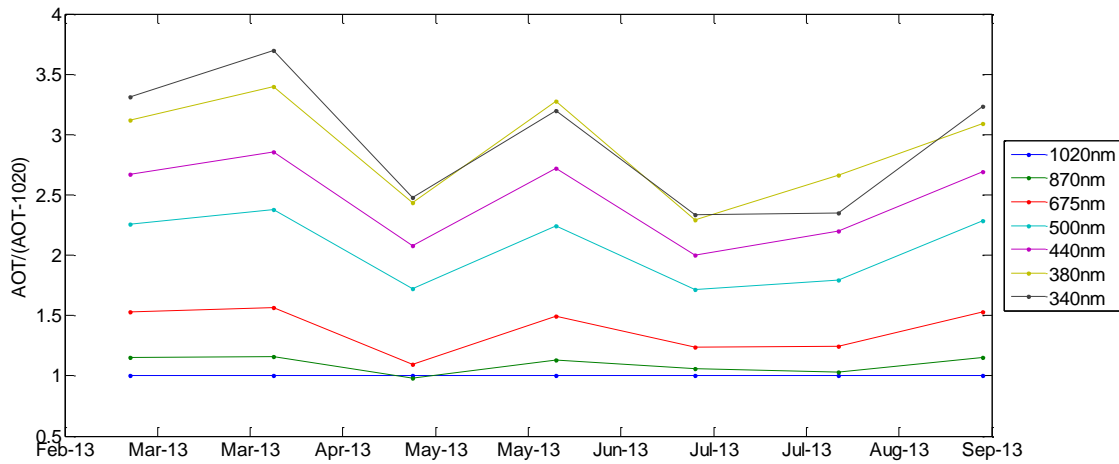


Figura 4-7 Relación entre el AOT a todas las longitudes de onda y el AOT a 1020nm. Las series se identifican con \*\*, porque no muestran valores de AOT, pero si su relación respecto al AOT a 1020nm.

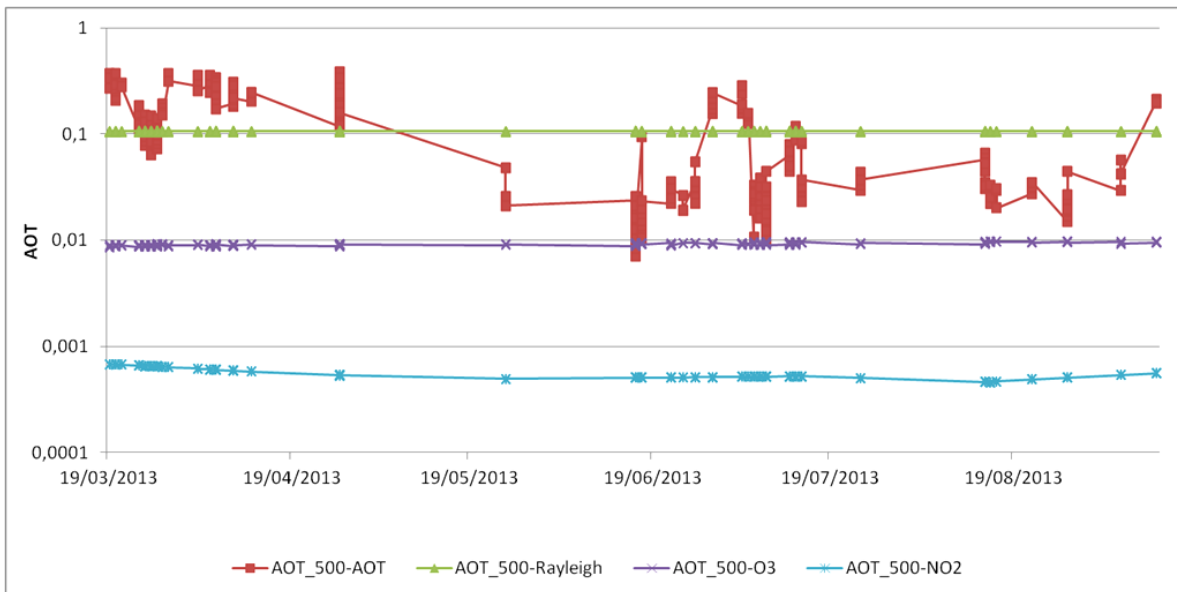


Figura 4-8 Composición del AOT a 500 nm

La figura 4-8 muestra la composición del AOT total a 500nm, y se pueden apreciar los comportamientos esperados para el AOT Rayleigh y de los gases, quedando demostrado que la variabilidad del AOT resulta ser bastante pequeña y estrictamente asociada a los aerosoles atmosféricos.

El análisis de las frecuencias relativas de los promedios diarios de AOT (figura 4-9), muestra que la mayoría de los datos, alrededor del 97%, para todas las longitudes de onda, se concentra entre 0 y 0,4, lo cual sugiere que Bogotá posee una atmosfera ligeramente contaminada por material particulado y específicamente por aerosoles atmosféricos, ya que se considera que un AOT de 0,4 corresponde a un ambiente urbano ligeramente contaminado, pero esto se discutirá más adelante. También es apreciable que para las longitudes de onda más grandes, el 98% de los datos es menor a 0,2 y el 77% es menor a 0,1, mientras que para las longitudes de onda más cortas, los datos están mucho más dispersos, siendo el 94% menor a 0,4 y solamente el 47% es menor a 0,1.

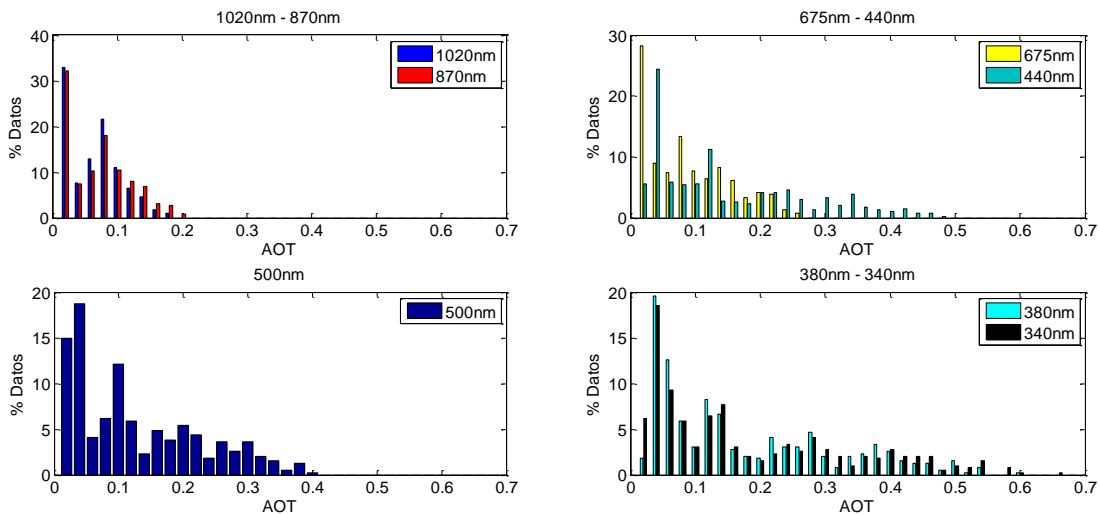


Figura 4-9 Frecuencia relativa de los datos de AOT para todas las longitudes de onda

El análisis horario (figura 4-10) muestra que más del 50% de los datos de AOT corresponden a observaciones realizadas entre las 7:00 y las 8:00 horas, mientras que entre las 17:00 y las 18:00 horas, se encuentra cerca del 12%. Además de los anteriores, solamente se registra un leve aumento de la frecuencia alrededor de las 9:30 horas con un pico del 7%, el resto de los datos están distribuidos esencialmente de forma uniforme a lo largo del día. Ahora bien, si se pretende encontrar una relación entre la variabilidad de los datos de AOT a lo largo del mismo día de medición, con la hora del día en la que se realizaron las mediciones, es necesario considerar las masas ópticas que normalmente temprano en la mañana y hacia el final de la tarde, son grandes, mientras que hacia el



medio día son bajas, registrándose datos de entre 1,0 y 4,9 con un promedio de 2,8, para el periodo de observación, pero sin que se presente una tendencia clara que explique la variabilidad del AOT a lo largo del día.

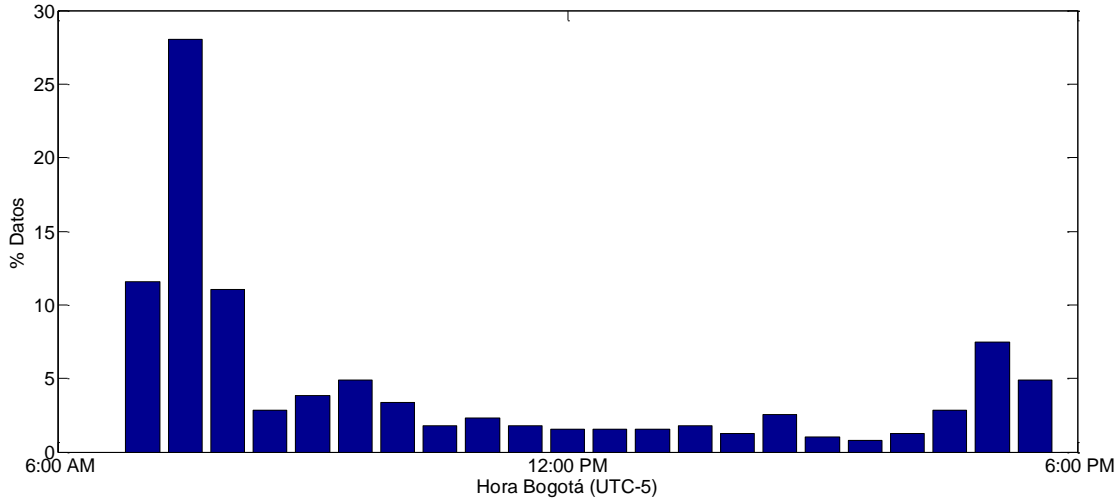


Figura 4-10 Distribución de frecuencia horaria para los datos de AOT

Analizar el comportamiento mensual y semanal del AOT, permite entender posibles correlaciones entre las características del mes del año o del día de la semana y su nivel de contaminación atmosférica. Para esto, en la figura 4-11 se presenta el comportamiento de los promedios mensuales empleando todos los datos de la serie temporal nivel 2.0 obtenida durante el periodo de observación, con un error estimado igual a la desviación estándar. De allí se puede inferir que para los meses de junio, julio y septiembre, la variabilidad de los datos es muy alta, incluso superando el promedio, como es el caso de junio. Este resultado es coherente con lo encontrado en el análisis del comportamiento diario de los datos, y lo que muestra es que en todos los meses se encuentran algunos días con mucha y otros con muy poca variabilidad, probablemente asociada a la actividad de la ciudad en tales días, así como a sus condiciones climáticas que como suele suceder en Bogotá, una mañana muy soleada, puede terminar en un fuerte aguacero en la tarde o la noche. También hay días sumamente nublados sin precipitaciones pero que impiden las observaciones fotométricas.

El análisis de los días de la semana, ilustrado en la figura 4-12, muestra un comportamiento del AOT, que se aleja un poco de lo que se esperaría teniendo en cuenta la actividad de la ciudad que presenta diferentes características en función del día. Tal como se esperaba, la figura 4-12 muestra que el domingo tiene un AOT menor que casi todo el resto de la semana, lo cual es razonable considerando las condiciones de tráfico

vehicular reducido y del bajo nivel de operación de la industria en la ciudad. Sin embargo, la situación del resto de la semana no registra la misma coherencia, ya que se esperaría que el lunes tuviera un AOT superior al del domingo y que conforme avanza la semana, vaya aumentando. Se espera un aumento en la carga de contaminación en la atmosfera hacia el final de la semana, específicamente en los días viernes y sábado, ya que la actividad de la ciudad en general termina más tarde los días viernes y el sábado no opera la medida de pico y placa que retira aproximadamente la mitad del parque automotor de las calles de la ciudad entre semana durante las horas pico, lo que hace que sea un día de mucha congestión vehicular y por consiguiente con altos niveles de emisión de material participado y otros contaminantes atmosféricos.

La tendencia de los datos es la esperada para los días miércoles, jueves y viernes, además del domingo, sin embargo, no se entiende por qué se presenta valores tan elevados para el día martes y tan bajos para el lunes, si como ya se mencionó, la tendencia de la semana es en ascenso, pero debería partir de un nivel superior al del domingo. Cabe destacar que las expectativas en cuanto al comportamiento del AOT a lo largo de la semana no son una regla general, porque todos los temas atmosféricos y especialmente el que se está discutiendo es altamente dependiente de los factores climáticos, los cuales, como también ya se mencionó, fluctúan de una semana a la otra, incluso en un mismo día se pueden tener condiciones completamente opuestas. Infortunadamente el volumen de datos con el que se cuenta no permite profundizar más en este aspecto y puede ser responsable de la alta variabilidad que muestran las barras de error de la figura.

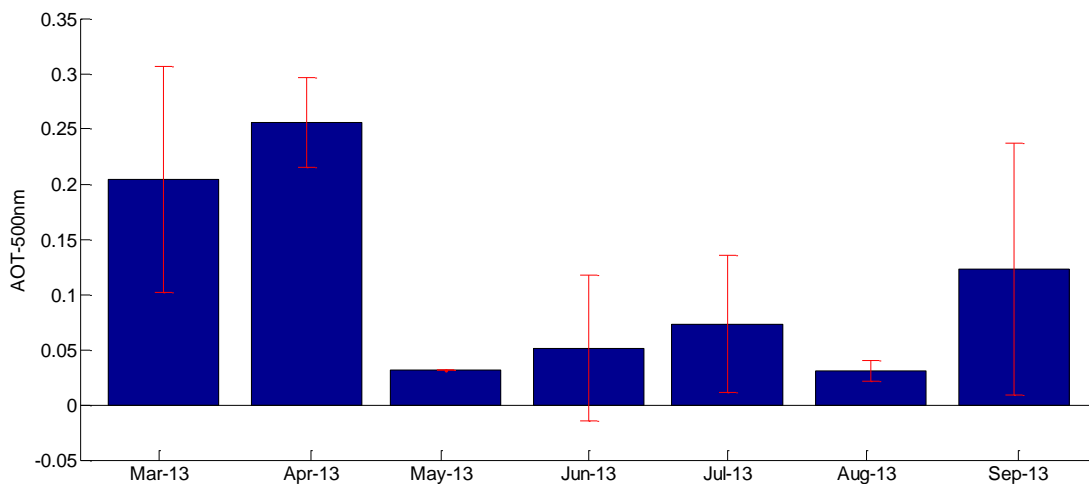


Figura 4-11 Promedios mensuales de AOT a 500nm

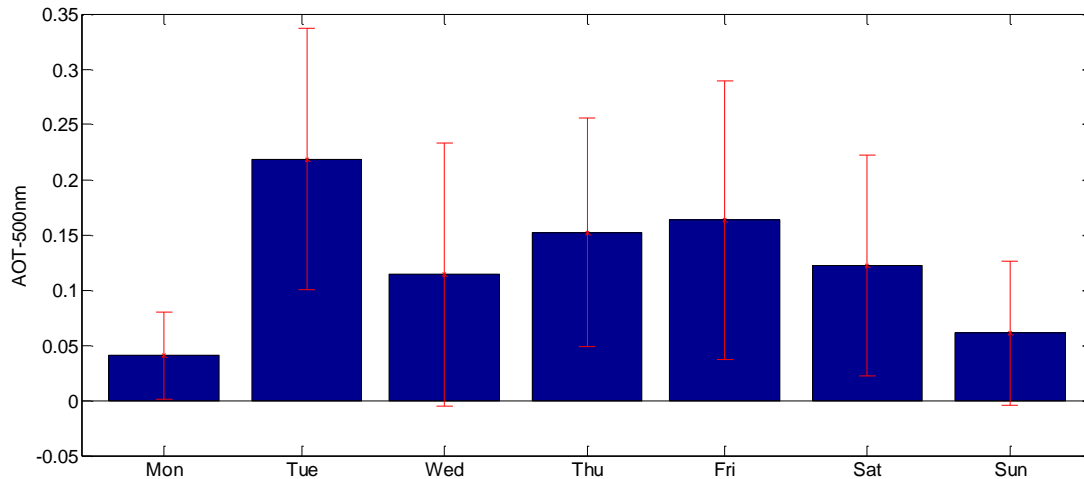


Figura 4-12 Distribución de los promedios diarios de AOT a 500nm

En general, a partir de todos los análisis realizados a las series temporales de AOT nivel 2.0, donde se encontraron entre otros resultados, que este oscila entre 0,0 y 0,4 con un promedio de  $0,13 \pm 0,11$ . Se evidencia una variabilidad importante, sobre todo para las longitudes de onda más grandes y durante los meses del primer semestre del año que fueron analizados; se podría pensar que Bogotá posee una atmosfera ligeramente contaminada por material particulado y específicamente por aerosoles atmosféricos, ya que se considera que valores de AOT cercanos a 0,4 son indicadores de un ambiente urbano ligeramente contaminado. Sin embargo, esta apreciación no necesariamente es realista, debido a que fenómenos como la deposición húmeda son capaces de remover grandes cantidades de partículas de la atmosfera y considerando el elevado número de episodios de lluvia que se presentaron durante el periodo de observación, se podría presentar un sesgo en los promedios mensuales o incluso diarios, además si se analizan las características actuales de la atmosfera Bogotana, se puede entender el tema de la contaminación por material particulado es el principal problema de calidad del aire en la ciudad, lo cual no resulta coherente con lo que nos muestran las series temporales de AOT analizadas.

La figura 4-13 muestra el comportamiento mensual de tres de las variables estudiadas hasta el momento, el AOT, la tasa de precipitación y la radiación solar global, y nos permite comprobar la fuerte correlación que existe entre los niveles medidos de AOT y la precipitación promedio, ya que mantienen un comportamiento inverso, producto del mecanismo de deposición húmeda que remueve parte de los aerosoles atmosféricos en los episodios de lluvia. Adicionalmente, la figura 2-17, muestra la correlación existente

entre la radiación solar que llega al suelo y el AOT medido por el fotómetro, las cuales presentan tendencias similares con se esperaba.

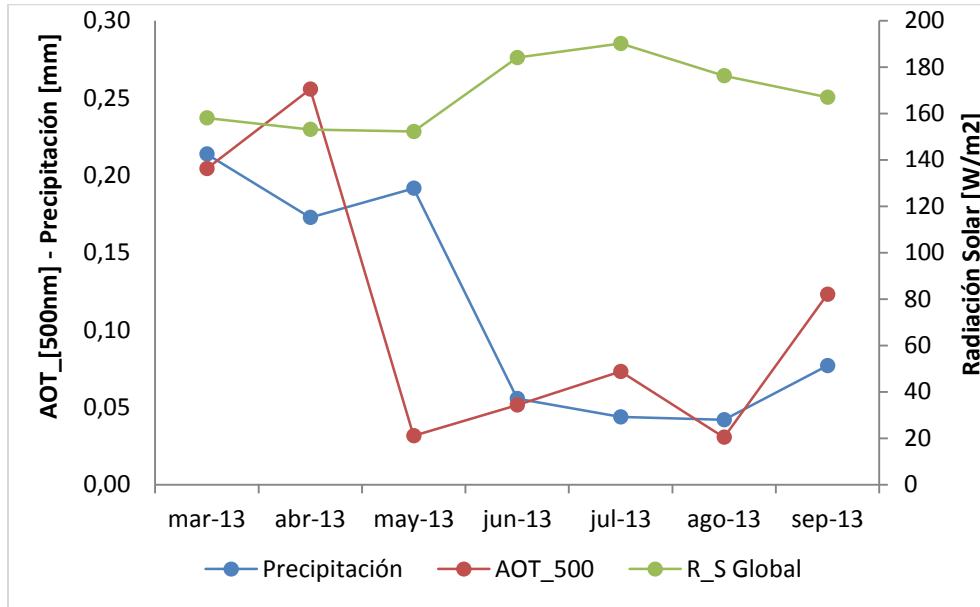


Figura 4-13 Comparación del comportamiento AOT a 500nm, Precipitación y Radiación solar global

#### 4.2.2 Exponente de Angstrom (AE)

El exponente de Angstrom (AE) o  $\alpha$  es un buen indicador del tamaño predominante de los aerosoles en la columna atmosférica, debido a la relación que existe entre el tamaño de partícula y la longitud de onda de la radiación incidente. Como se mencionó anteriormente, los valores de AE oscilan entre 0 y 4, siendo los valores más altos, indicativos de modos de partículas finas, mientras que los valores cercanos a cero indican la presencia de partículas gruesas.

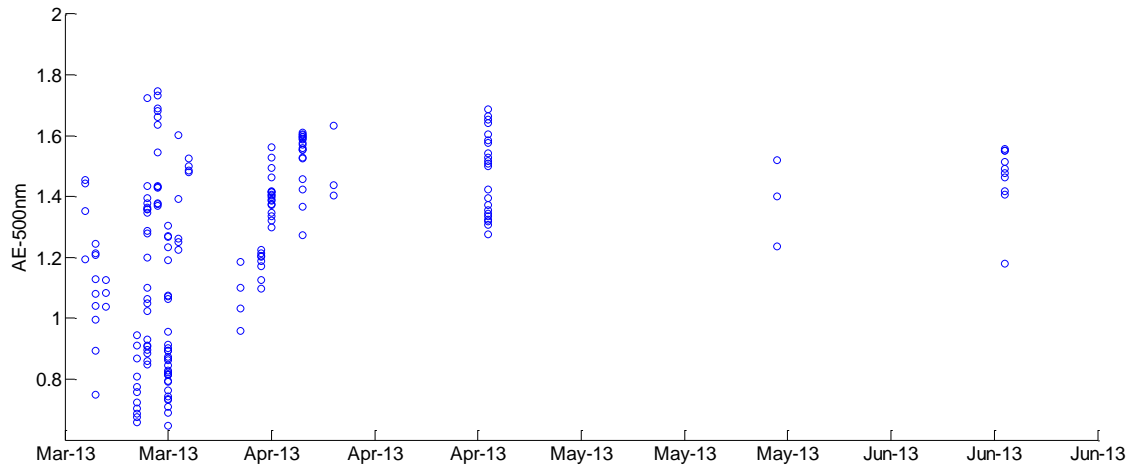


Figura 4-14 Promedio mensual del exponente de Angstrom a 500nm

Cuando se analiza la serie de promedios diarios (figura 4-14), surgen algunos episodios que amplían el rango en el que fluctúa el AE que toma valores desde 0,4 hasta 1,9, sin que esto cambie la perspectiva que se tiene a partir de los promedios mensuales. Se sabe que cuando la distribución está constituida principalmente por partículas finas, el AE crece hasta valores de 1,5 – 2,0, mientras que cuando se centra en partículas de mayor radio (polvo, partículas higroscópicas o agregadas), disminuye hasta valores casi nulos (incluso negativo en algunas ocasiones) (Estelles, 2006).

El análisis de las mediciones realizadas durante la campaña de monitoreo, indica que para el periodo de observación, el AE a 500nm promedio es de  $1,27 \pm 0,2$ , oscilando entre 1,2 y 1,4, con una variabilidad relativamente alta, sobre todo para los meses de marzo y julio. El comportamiento a través de los meses, no presenta variaciones importantes (figura 4-15).

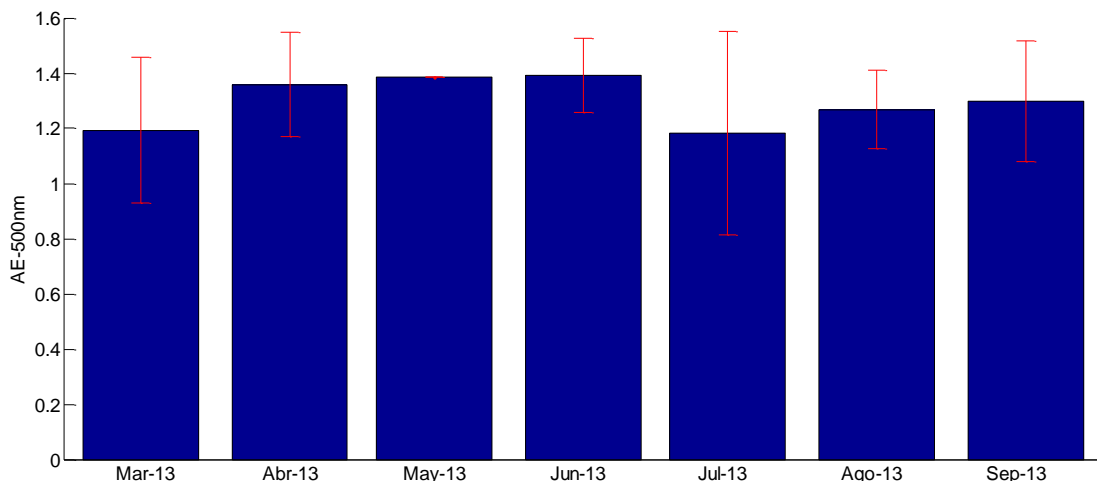


Figura 4-15 Promedio mensual del exponente de Angstrom a 500nm

La figura 4-16, muestra la distribución de los datos de AE, y allí se puede evidenciar que más del 75% de las mediciones se ubican entre 1,0 y 1,8, lo cual es coherente con lo dicho anteriormente, y pondría sobre el papel una distribución con un modo importante de partículas finas, pero también muestra la posible existencia de un modo grueso. Esto se evaluará cuando se analice la distribución de tamaños.

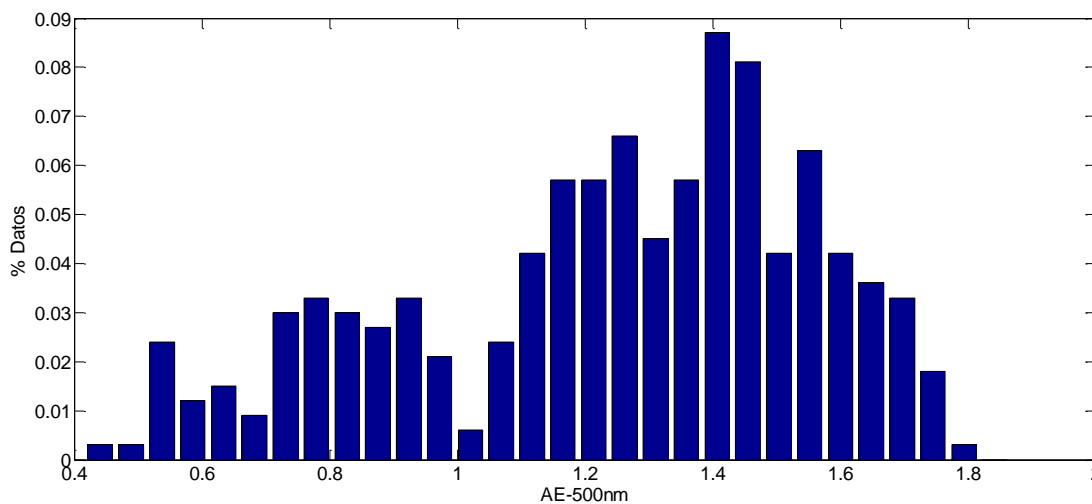


Figura 4-16 Distribución de los datos de AE a 500nm

### 4.2.3 Correlación AOT – AE

Debido a las características de Bogotá es esperable que presente grandes cantidades de aerosoles urbanos, dadas las grandes fuentes de emisión de partículas tanto fijas como móviles. Sin embargo, la figura 4-17 indica la presencia de aerosoles principalmente de tipo continental, que presentan un AE alrededor de 1,4 aproximadamente y sus niveles de AOT oscilan entre 0,02 y 0,38. No se evidencia la presencia de aerosol urbano, ya que a pesar de que los valores del AE son acordes con este tipo de aerosol, los niveles de AOT encontrados no son suficientemente altos como para ser considerados como tal.

También se aprecia la presencia de aerosoles cuyos valores de AOT están por debajo de 0,1 con AE inferiores a 1, lo cual indica que se trata de partículas gruesas, que se cree pueden indicar trazas de polvo resuspendido presentes en la atmosfera, lo cual es muy probable dada la alta cantidad de esta clase de partículas en el material particulado presente en la atmosfera Bogotana (Vargas & Rojas, 2010).

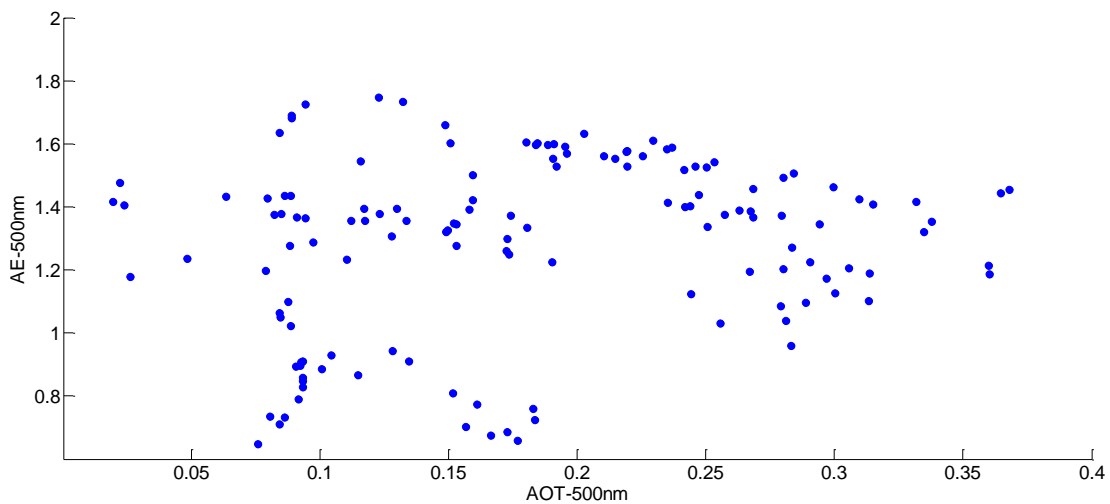


Figura 4-17 Diagrama de dispersión entre el AOT y el AE a 500 nm

### 4.2.4 Distribución del AOT entre fracción fina y gruesa

Para establecer cuáles son las posibles fuentes de aerosoles atmosféricos o de material particulado que contamina la atmosfera, una primera aproximación está en determinar la fracción del AOT que corresponde a partículas gruesas, generalmente asociadas a polvo resuspendido, y la fracción de partículas finas, asociadas a la polución urbana y a la quema

de biomasa. La figura 4-18, muestra la distribución del AOT asociado a partículas finas y gruesas para toda la serie temporal de datos nivel 2.0. Nuevamente no se percibe una tendencia o un dominio claro de alguna de las dos fracciones, sin embargo, se puede ver una ligera superioridad del modo de partículas finas, probablemente asociado a las emisiones de los vehículos diesel, que en Bogotá en su mayoría corresponden al transporte público, por lo cual tienen un factor de actividad muy importante y son una enorme fuente de partículas tanto finas como gruesas. Adicionalmente, existen una gran cantidad de industrias al interior de la ciudad, que también utilizan combustibles fósiles para generar energía y que por tanto contribuyen a la contaminación de la atmosfera Bogotana por material particulado. Al analizar la relación entre los promedios mensuales del modo fino y grueso (figura 4-19), se puede observar un dominio marcado del modo fino, de un poco más del 70% para los meses marzo, abril, junio y septiembre, mientras que para los meses de julio y agosto, la relación cambia y el modo fino pasa a ser entre el 50 y el 60% aproximadamente. Esto puede deberse al cambio en las condiciones climáticas de la ciudad, ya que estos últimos dos meses (julio-agosto), se caracterizan por ser temporadas secas, con bajos niveles de precipitación y fuertes vientos, que podrían ser responsables de poner en la atmosfera mayores cantidades de polvo resuspendido y partículas gruesas con respecto a los otros meses del periodo de observación.

En la figura 4-20 se presenta el análisis de los promedios para cada día de la semana con todos los datos de la serie, muestra un elemento interesante y de cierta forma esperado, ya que para el día domingo, de acuerdo a los datos registrados, el promedio de la distribución se parte exactamente al 50% para cada modo, a diferencia del resto de la semana donde el modo fino es dominante, lo cual se justifica considerando la reducción en la actividad productiva y el tráfico vehicular de la ciudad, teniendo en cuenta que las partículas finas comúnmente son producto de la combustión incompleta de los vehículos y demás fuentes de combustión de combustible fósil, por lo que se espera que, tal como lo muestra la serie, se reduzca el tamaño del modo fino sin que se evidencie un cambio apreciable en la fracción gruesa durante el fin de semana.



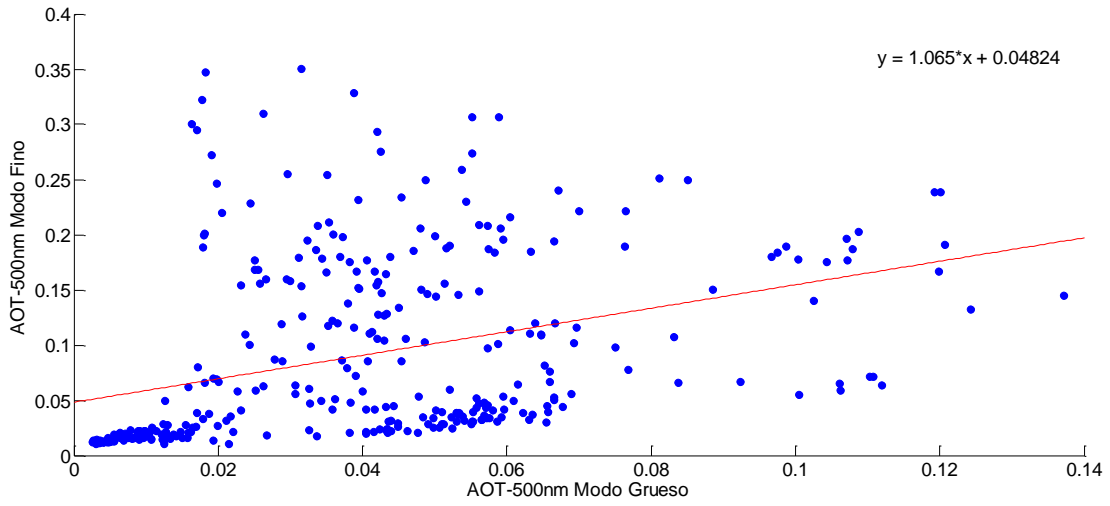


Figura 4-18 Distribución entre los dos modos de AOT a 500nm, para los modos fino y grueso

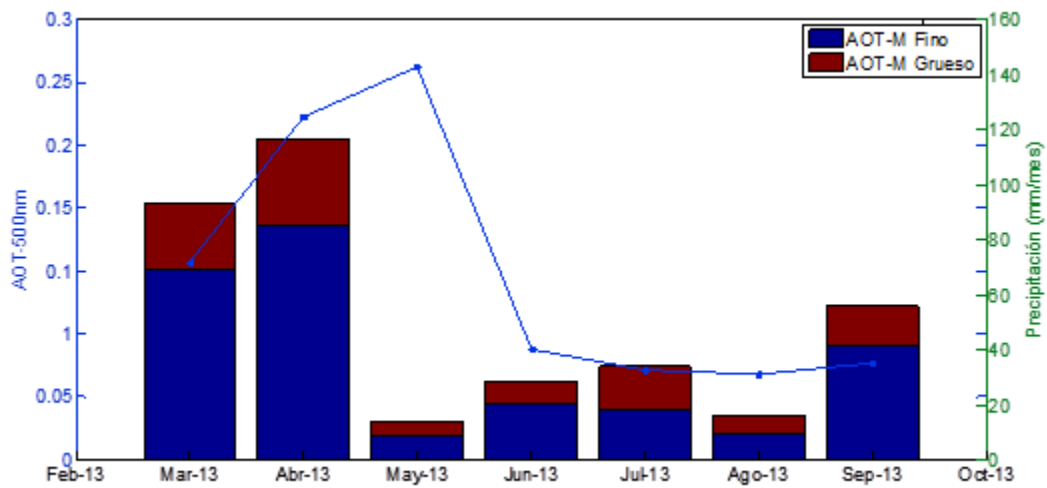


Figura 4-19 Comparación de la distribución del AOT a 500nm entre el modo fino y grueso (promedio mensual) y su relación con la tasa de precipitación mensual. La altura total de la columna corresponde al AOT total a 500nm.

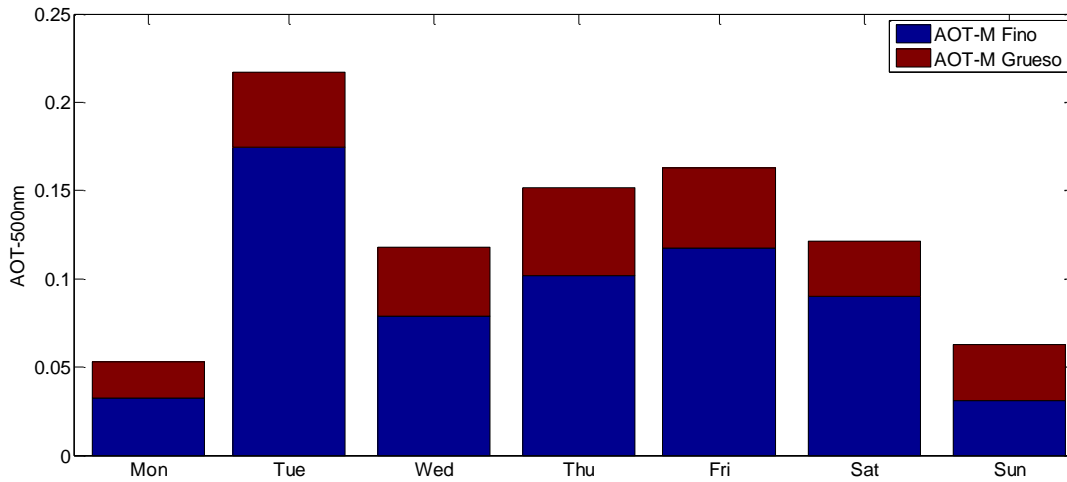


Figura 4-20 Distribución del AOT a 500nm entre el modo fino y grueso (promedio diario) para cada día de la semana

### 4.2.5 Vapor de agua precipitable

El producto obtenido a partir de la medida de la extinción en el canal de 940 nm del fotómetro, es el vapor de agua precipitable. Los resultados obtenidos durante la campaña, se muestran en la figura 4-21, y no presentan una tendencia clara, ni alguna correlación apreciable con los factores meteorológicos analizados, específicamente, la precipitación mensual (figura 4-22).

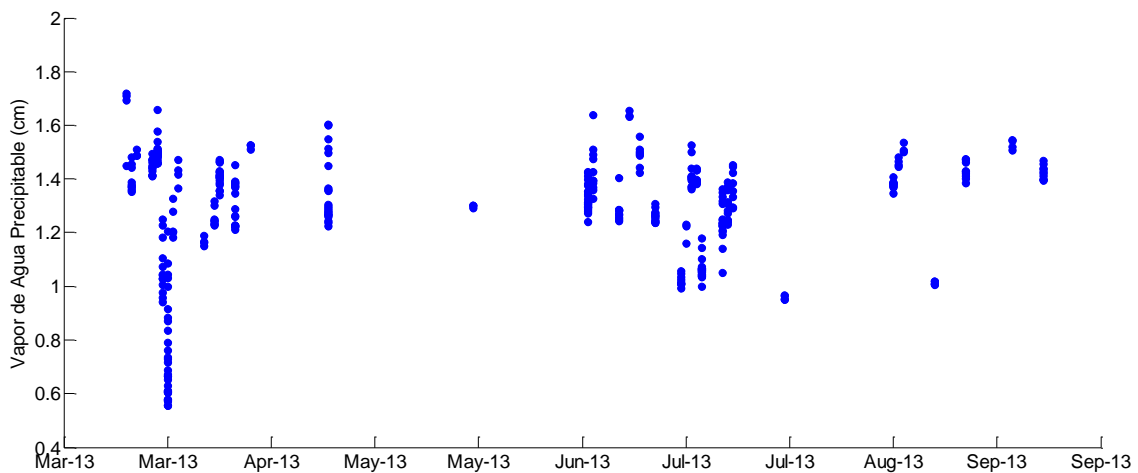


Figura 4-21 Promedios diarios del contenido vapor de agua precipitable en la columna atmosférica

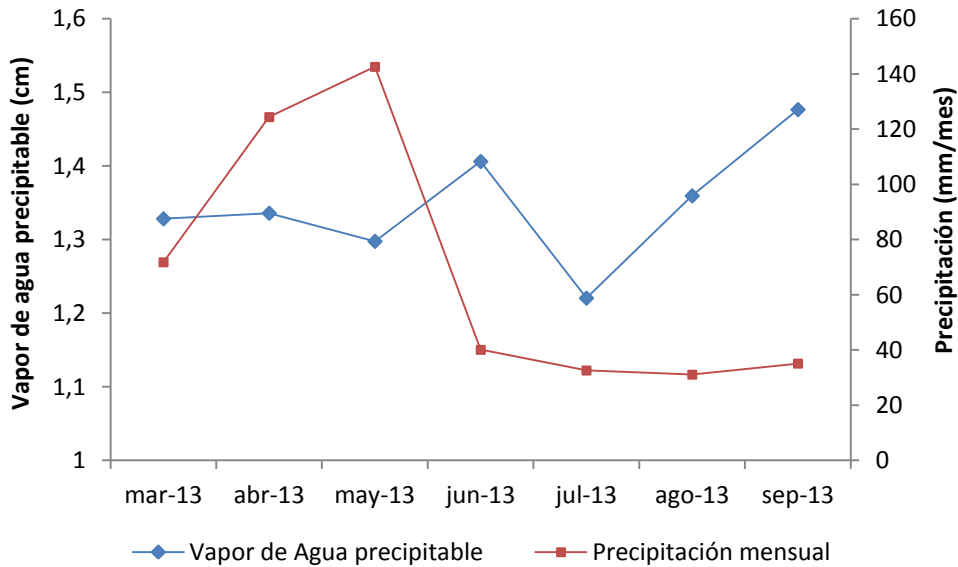


Figura 4-22 Comparación entre los promedios mensuales de contenido vapor de agua precipitable en la columna atmosférica y la tasa de precipitación mensual

### 4.3 Análisis de productos de inversión

#### 4.3.1 Distribución de tamaños

Como se mencionó anteriormente, el exponente de Angstrom (AE), está asociado directamente con el radio medio de los aerosoles. Previamente se analizó la variabilidad de los valores del exponente de Angstrom registrados durante la campaña de monitoreo, los cuales van desde 0,04 a 1,9 y se presume la existencia de dos modos, uno de partículas finas (dominante), y otro, menos claro con partículas gruesas, sin embargo, no se aprecia una tendencia clara. Estos valores por si mismos no permiten determinar la proporción de partículas gruesas o finas en la columna atmosférica analizada. La figura 4-23 presenta las distribuciones de tamaños de partícula (nivel 2.0), que fueron obtenidas durante la campaña de medición y que por coincidencia todas corresponden a días sábados. En general, no hay una tendencia clara en las distribuciones, ya que para el día 6 de abril, se evidencian dos modos principales cuyos diámetros de partícula se encuentran alrededor de 0,3 y 10  $\mu\text{m}$ , siendo el más pronunciado el modo fino, lo cual muestra que la mayoría de las partículas tienen diámetros pequeños. De otra parte, para el 27 de abril, se

observan nuevamente los dos modos, con los mismos diámetros de partícula, pero esta vez el modo grueso es dominante.

Para analizar estos resultados, es necesario considerar los aspectos meteorológicos, ya que son los únicos que podrían afectar la composición atmosférica en el periodo analizado, ya que se trata del día mismo día de la semana, esencialmente a la misma hora del día en un mes donde no se registran actividades particulares en Bogotá. Cuando se revisa la serie de datos de precipitación, se evidencia que el 6 de abril hubo alrededor de 0,2 mm de lluvia, lo cual podría haber removido de la atmosfera parte de las partículas grandes que conforman el modo grueso, haciendo que el modo fino luzca dominante. En el caso del 27 de abril, el día fue totalmente seco, lo cual favorece la presencia de polvo resuspendido en la atmosfera, que podría ser responsable del modo grueso dominante en la distribución de tamaños de partícula obtenida para ese día.

Para las distribuciones del 6 y el 13 de julio, el comportamiento es totalmente diferente, ya que si bien en ambas se evidencian dos modos, estos no coinciden ni en diámetro de partícula ni en amplitud. Sin embargo, se debe tener en cuenta que estas dos distribuciones están al principio y al final del día, lo que sí podría afectar la composición atmosférica. Para la serie del 6 de julio, que corresponde a las horas de la tarde, en un día totalmente seco, los modos coinciden aproximadamente con los de abril, pero no se entiende la razón del comportamiento plano de la serie. Por otra parte, la distribución del 13 de julio, también de la mañana y también día sin lluvias, los modos se desfasan de los demás y resulta un modo grueso dominante con diámetros de partícula de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$  y un modo fino pequeño con diámetro de 0,16 aproximadamente. Esta serie, tampoco se entiende, pero su comportamiento podría estar asociado a una ligera reducción en la actividad de la ciudad, debido al periodo de vacaciones de mitad de año, en el cual se reduce el tráfico de vehículos escolares.

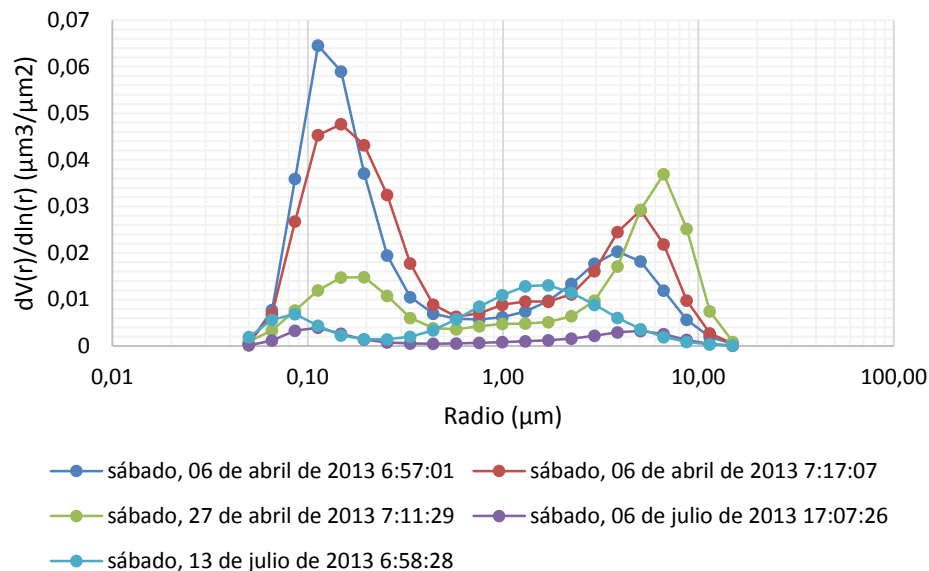


Figura 4-23 Distribuciones de tamaño 2.0 obtenidas durante toda la campaña de monitoreo

### 4.3.2 Albedo de dispersión simple

El albedo de dispersión simple es indicativo de la absorción del aerosol sobre la radiación incidente. Si tiene un valor igual a la unidad, no existe absorción y la extinción de la radiación producida por la partícula es debida exclusivamente a la dispersión. En la siguiente figura se muestran los escasos datos que alcanzaron el nivel 2.0, y que no nos permiten concluir nada respecto a esta propiedad (figura 4-24).

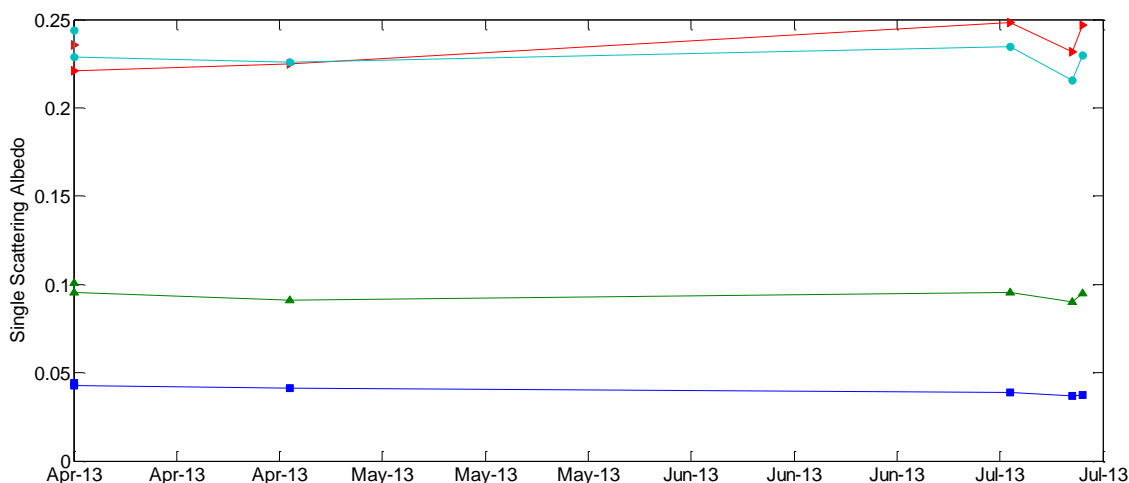


Figura 4-24 Albedo de dispersión simple nivel 2.0 obtenidos durante toda la campaña de monitoreo

#### 4.4 Análisis de composición de PM10

A partir de las muestras colectadas en ciclos de 24 horas aproximadamente, se obtuvieron los contenidos de carbono orgánico, elemental y de metales, que muestran la misma tendencia que presenta el PM10, colectado en cada muestra, en lo que a la masa se refiere, como se aprecia en la figura 4-25. Se puede ver que las fracciones de carbono dominan el contenido de las muestras, ya que la fracción de iones es muy pequeña en todas. Se analizaron cuatro cationes, Sodio, calcio, potasio y amonio, y cuatro aniones, Cloruros, sulfatos, nitritos y nitratos, los cuales son los que se esperaba que estuvieran presentes en el material particulado presente en la atmosfera de Bogotá.

La siguiente tabla resume los resultados de los análisis de iones y carbono total. Como se puede apreciar, en general para todas las muestras el contenido de aniones fue mucho mayor que el de cationes de los cuales el potasio no se detectó en ninguna muestra y en menos del 3% de las muestras se encontró amonio, siendo el calcio el único catión que se encontró en un número importante de muestras, alrededor del 47%, con concentraciones muy variables.

El contenido de iones, principalmente sulfatos, nitratos y calcio encontrado en las muestras aporta cerca del 7% en promedio del material particulado recuperado con los análisis de composición, lo cual se aproxima a lo encontrado por Vargas et. al., (2011). Por el contrario las fracciones de carbono muestran aportes superiores a los registrados en estudios previos, que proponen una fracción de carbono total (EC y OC) de entre el 15 y 60%. Se encontró que el OC varía entre el 48 y el 87%, mientras que el EC oscila entre 10 y 38%, lo cual indicaría un promedio cercano al 90% de Carbono total.

##### Resumen de resultados de análisis de composición

	OC	EC	Cloruros	Nitritos	Sulfatos	Nitratos	Sodio	Amonio	Calcio	Aniones Totales	Cationes Totales
<b>Promedio</b>	63,60%	29,09%	1,07%	0,32%	3,68%	3,75%	0,20%	1,79%	3,04%	5,69%	1,61%
<b>Máximo</b>	86,74%	38,47%	2,82%	1,13%	7,17%	7,58%	0,57%	1,79%	14,09%	15,08%	14,17%
<b>Mínimo</b>	47,72%	10,12%	0,10%	0,03%	1,12%	0,33%	0,03%	1,79%	0,00%	1,22%	0,00%
<b>% de muestras con el ion encontrado.</b>			32,35%	73,53%	100,00%	38,24%	17,65%	2,94%	47,06%		

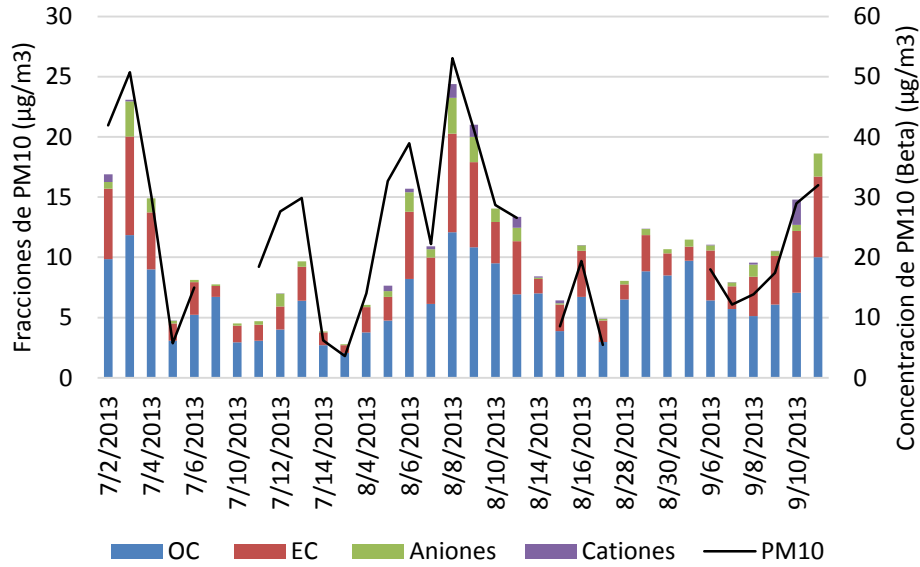
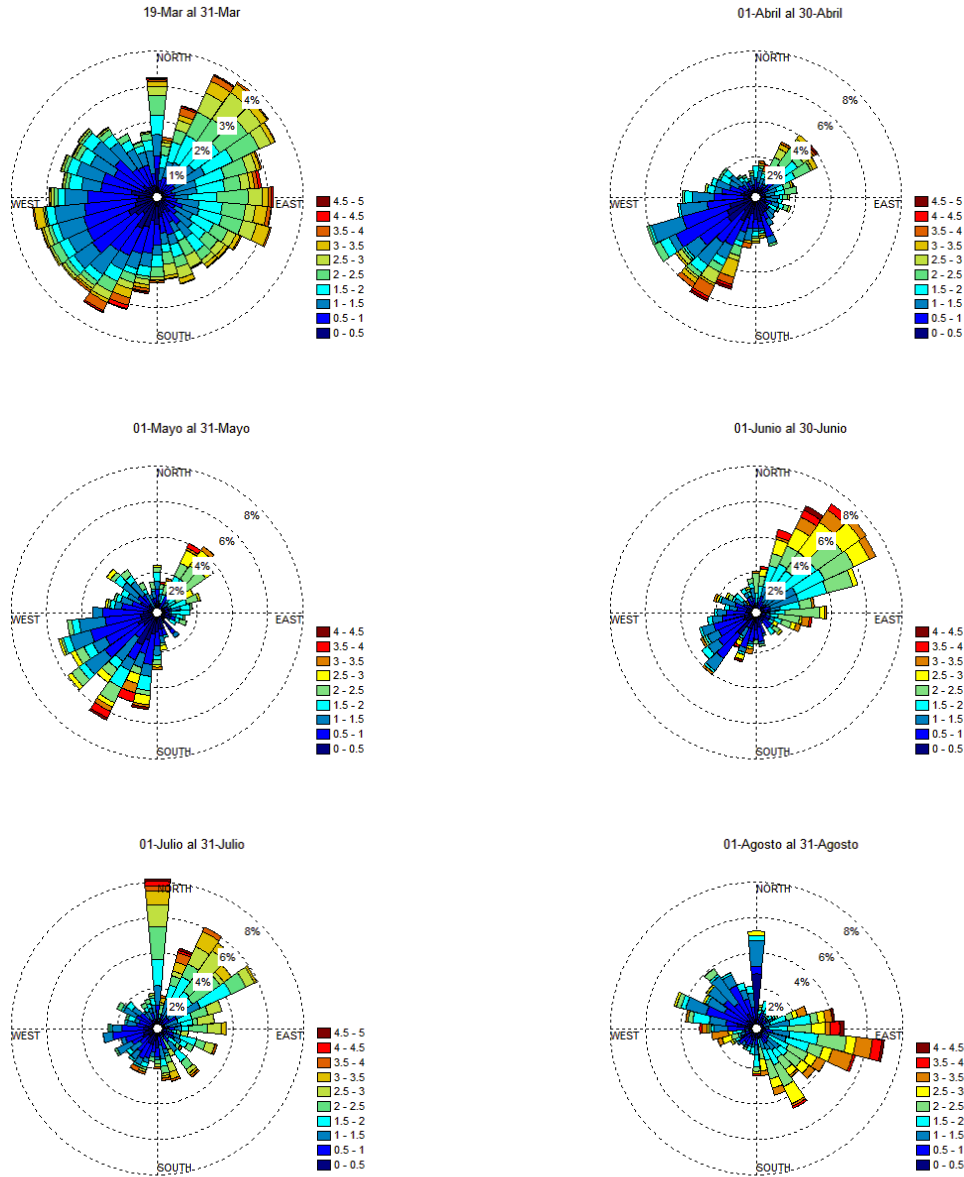


Figura 4-25 Fracciones de PM10 contra la concentración inicial del mismo

Si bien la tendencia de las masas muestreada (PM10) y recuperada por análisis químico (barras apiladas) se ajusta bastante bien, se debe mencionar que en promedio los análisis permitieron recuperar alrededor del 55% de la masa de PM10 inicial, lo cual puede indicar la presencia de otros compuestos que no fueron analizados en este estudio, como polvo resuspendido o fugitivo, compuestos orgánicos volátiles, metales y/o algunos otros iones como los carbonatos, que según estudios previos realizados en la ciudad (Pachon et. al., 2008) (Rivera and Behrentz 2009) pueden aportar de forma importante a la masa total del PM10 de la ciudad.

En la figura anterior se pueden apreciar diferencias tanto en la concentración total de material particulado en la muestra, como en la composición del mismo en algunos episodios, donde se reducen de forma importante la concentración de iones, pero sobre todo, de carbono elemental en relación con la de carbono orgánico. Esto podría estar relacionado con el origen de las masas de aire muestreadas en tales episodios, por lo se analizó la procedencia del viento para los meses que duro la campaña de monitoreo de aerosoles y la de muestreo de material particulado. La figura 4-26, presenta las rosas de viento mensuales y entre los principales aspectos a resaltar de estas graficas, se tiene la gran variabilidad en la dirección y la velocidad del viento para el sector de Bogotá donde se encuentra el sitio de muestreo, que a pesar de encontrarse alejado, está rodeado de vías con alto flujo vehicular, zonas residenciales e industriales, que podrían afectar la composición del aire que llega a los muestreadores.

Analizando las rosas de vientos y la composición de las muestras analizadas, no se aprecia una tendencia clara, que permita establecer las causas de la pequeña, pero evidente variabilidad en la concentración y la composición del material particulado en Bogotá.





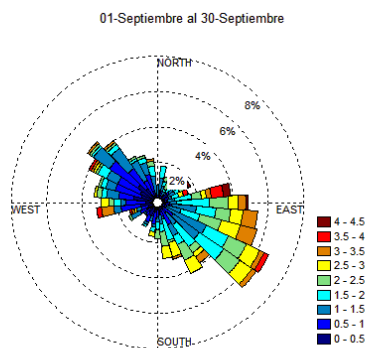


Figura 4-26 Rosas de viento para los meses de la campaña de monitoreo AERONET

### 4.4.1 Análisis de fracciones de carbono

Uno de los elementos más importantes de los aerosoles es su capacidad para servir como núcleos de condensación, la cual se relaciona directamente con la higroscopicidad de las partículas, razón por la cual, la fracción de carbono orgánico soluble en agua (WSOC por sus siglas en inglés) resulta de interés cuando se analiza el material particulado presente en la atmosfera. Adicionalmente, la fracción WSOC es considerada como una de las principales fuentes que contribuye a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA por sus siglas en inglés) (Sullivan et. al, 2004).

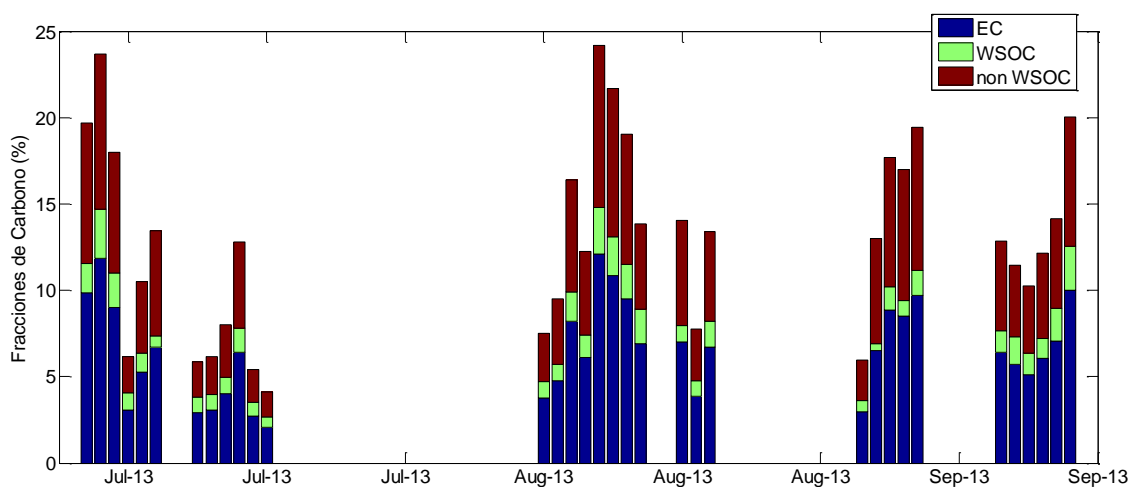


Figura 4-27 Fracciones de Carbono presentes en el PM10 analizado

La figura 4-27 muestra la relación encontrada entre las fracciones de carbono para las muestras analizadas, y se pueden observar aspectos como la proporcionalidad que muestra la fracción de WSOC a lo largo de todo el periodo de muestreo manteniendo una variabilidad bastante baja con relación a las fracciones de carbono orgánico no soluble en agua (non WSOC) y EC. Esto podría ser indicativo de la estabilidad de las fuentes de este tipo de material. Cabe destacar que las principales fuentes de estas fracciones de material particulado, muy probablemente sean las emisiones vehiculares y las fuentes fijas de combustión de combustibles fósiles, que como ya se mencionó, esta presentes en las zonas circunvecinas al sector donde se llevó a cabo el muestreo.

Por otra parte, la relación entre el Carbono orgánico (OC) y el carbono elemental (EC) se ha empleado como un indicador de emisiones por combustión de combustible diésel, y de acuerdo a Seinfeld y Pandis (1998) un valor de OC/EC entre 1 y 1,2 indica la presencia de fuentes (móviles o fijas) que usan dicho combustible. Esta relación se ve afectada, haciendo que su valor aumente, por la presencia de azufre en el combustible, lo cual en la ciudad ya no representa un problema. Sin embargo, otras variables que afectan la relación, son las condiciones del parque automotor y del tráfico de la ciudad, debido a los cambios en los regímenes de combustión, a la tecnología de los motores, etc.

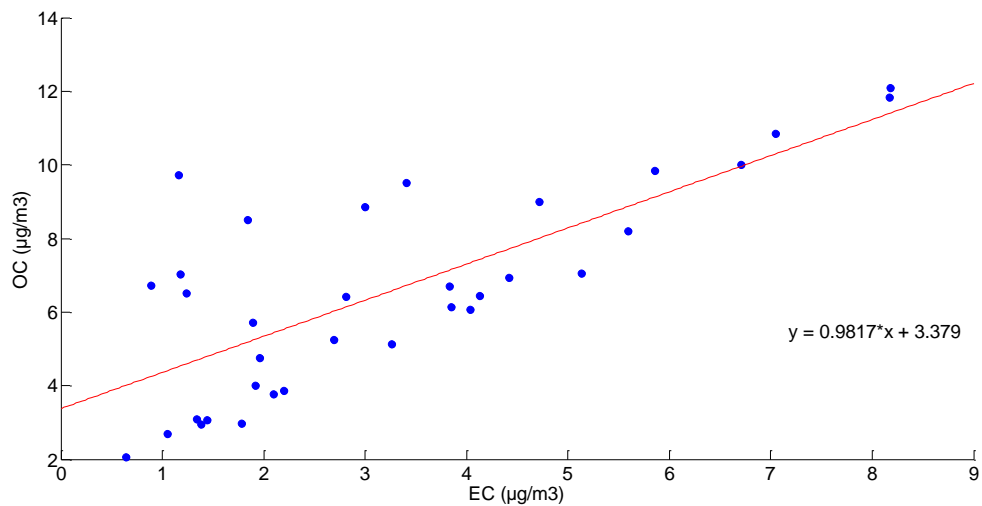


Figura 4-28 Relación entre OC y EC

La figura 4-28 muestra la relación OC/EC, muestra un dominio de la materia orgánica, que puede ser causado por cambios en algunas de las variables que afectan las principales fuentes de carbono elemental, como lo son los vehículos, cuyo grado de heterogeneidad

tanto en sus características propias, como en las condiciones de operación es muy alto. Adicionalmente, debido a la variabilidad en la dirección del viento presentado en el Centro de Alto Rendimiento, se pueden esperar diferentes composiciones en las masas de aire, específicamente en cuanto a la relación de fracciones de carbono.

Como parte de la campaña CASERIBO, se realizaron los análisis de composición antes descritos, y adicionalmente, se realizaron análisis elementales de composición específicamente para detectar un gran número de compuestos orgánicos volátiles, entre los que se incluyen algunos marcadores que caracterizan ciertos tipos de emisiones, que permitirían identificar las fuentes del material particulado en la ciudad. Esto se realizara mediante la aplicación del modelo CMB (balance de masa química), Modelo EPA CMBv8.2 que es uno de varios modelos de receptor que se ha aplicado a problemas de calidad del aire en las dos últimas décadas. Como anexo a este documento se presenta los resultados gráficos preliminares.

## **4.5 Análisis de relaciones entre propiedades fotométricas y composición**

### **4.5.1 Correlación PM10 – AOT\_500nm**

Diferentes estudios han buscado encontrar una buena correlación entre el AOT y el PM10. La figura 4-29 muestra cuatro gráficas para tres ciudades diferentes y diferentes condiciones climáticas.

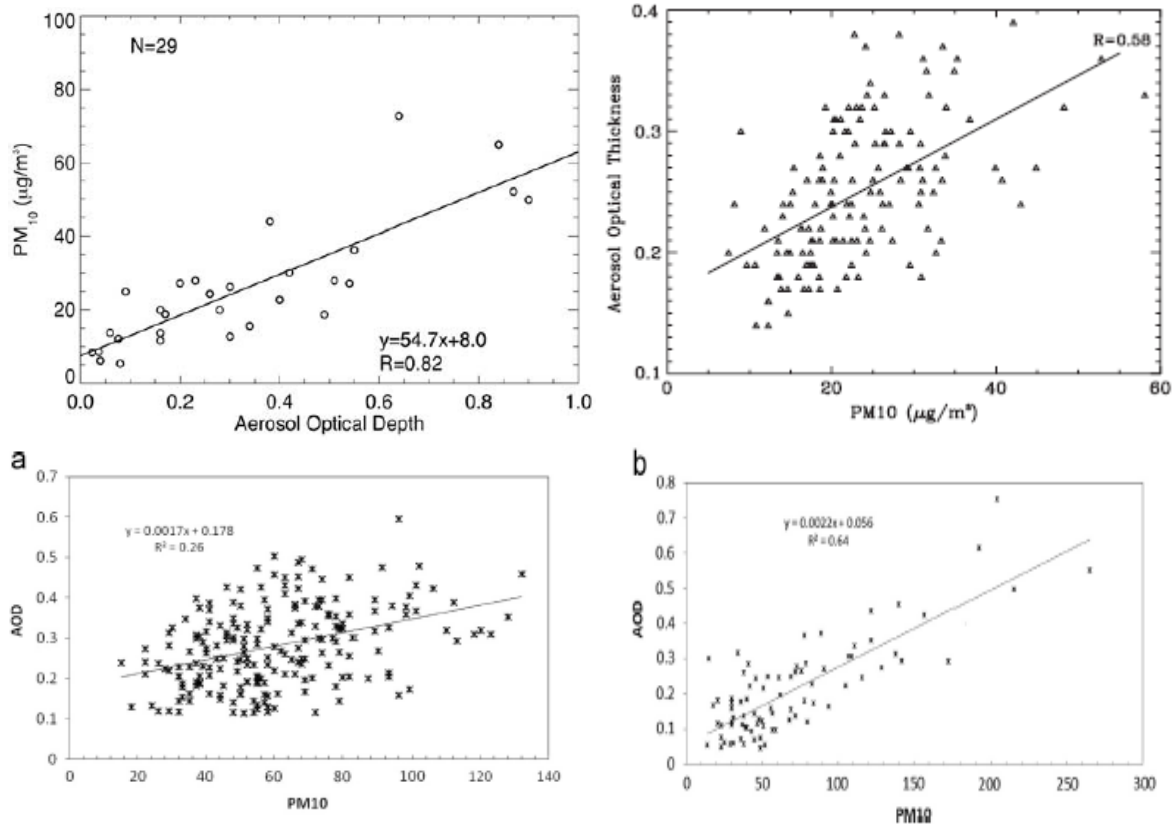


Figura 4-29 Diagramas de dispersión de AOT contra PM10. Arriba a la izquierda, mediciones de agosto a octubre del 2000, en una ciudad del norte de Italia, tomado de Chu, 2003. Arriba a la derecha, Background de AOT para sitios rurales de Europa en 2003, tomado de Koelemeijer, 2006. Abajo mediciones para la ciudad de Zanján al noroeste de Irán, a la derecha para la estación de invierno y a la izquierda para el verano para el periodo 2009 – 2010.

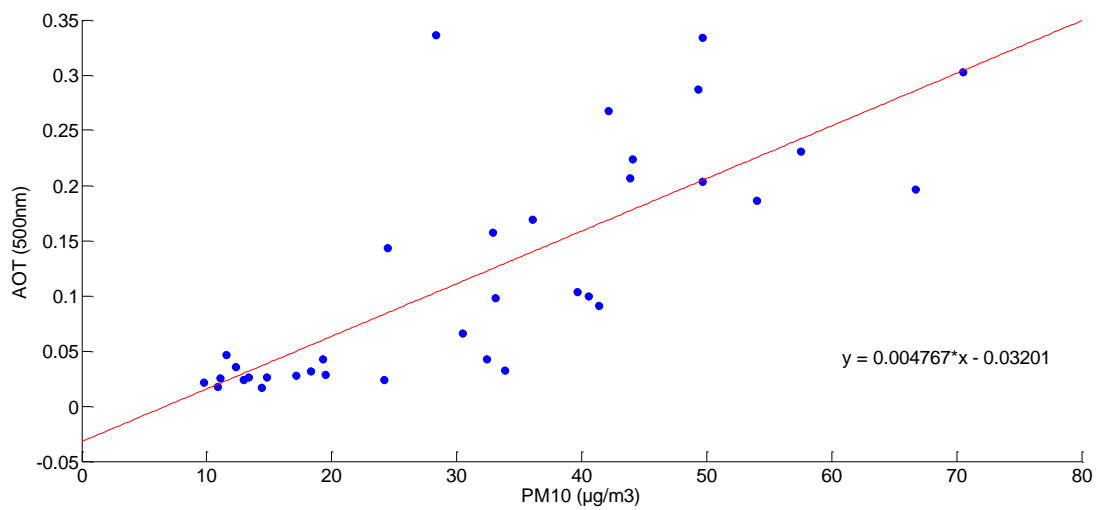


Figura 4-30 Correlación entre el AOT y el PM10

En general, todos los autores encontraron correlaciones similares a la obtenida en este estudio (figura 4-30), empleando los promedios diarios de PM10 y de AOT a 500nm, solamente Chu, (2003) encontró una mejor correlación, pero como el mismo lo describe se debe a las condiciones topográficas de la ciudad, que prácticamente encierran la masa de aire sobre la ciudad permitiendo la acumulación de contaminantes y evitando la mezcla con otros tipos de aerosoles caso contrario al nuestro, donde la variabilidad del AOT aunque en un rango pequeño, es alta y las concentraciones de PM10 también presentan alta variabilidad como se aprecia en la siguiente figura.

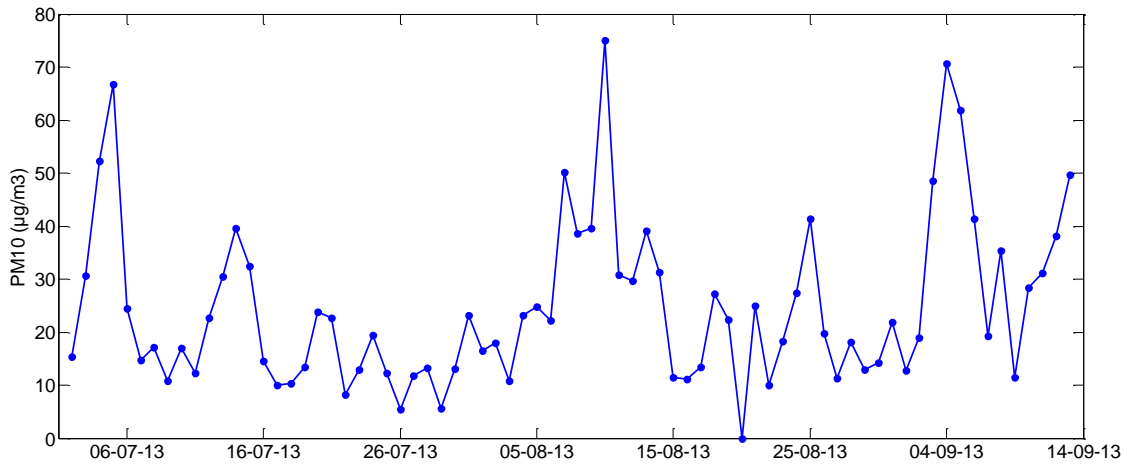


Figura 4-31 Serie de PM10 tomado por la RMCAB

## 4.6 Análisis de correlación entre AOT y PMx

Con el fin de establecer la relación entre la distribución de tamaños obtenida a partir de las series de material particulado PM1.0, PM2.5 y PM10, que se tomaron durante una parte de la campaña de muestreo, y la distribución de tamaños que se puede obtener a partir de los datos tomados con el fotómetro Solar de AERONET, específicamente del AOT y su distribución entre partículas finas y gruesas, se presentan relaciones para tales variables. Las figuras 4-33, 4-34 y 4-35 muestran las relaciones entre PM1.0, PM2.5 y PM10 en todas las combinaciones posibles, con el fin de encontrar la que tenga mayor similitud a la relación entre el AOT para el modo fino y el AOT total mostrada en la figura 4-32.

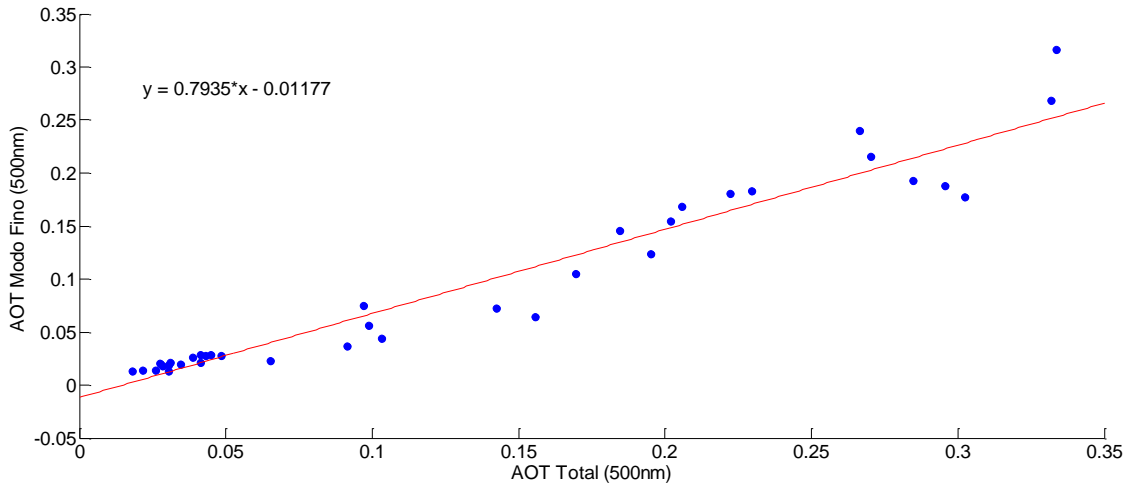


Figura 4-32 Correlación entre el AOT total y el AOT para el modo fino

Es de esperarse que la relación entre las concentraciones de PM10 y PM2.5 o incluso PM10 y PM1.0, presenten un comportamiento similar al que presenta la relación entre AOTs mostrada en la figura anterior, considerando los tamaños de partícula de cada una de las fracciones antes mencionadas. Sin embargo, las figuras siguientes no permiten establecer una correlación muy similar a la de AOTs.

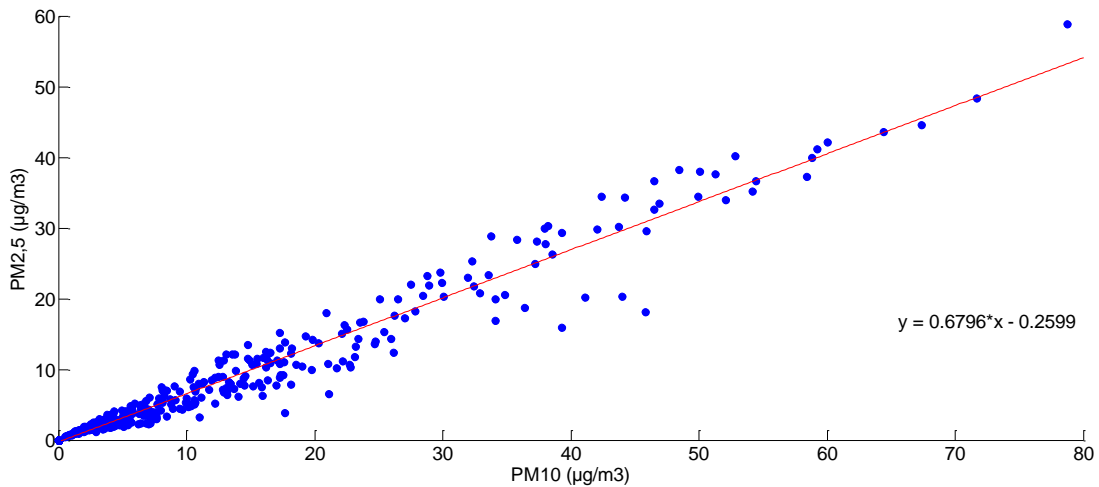


Figura 4-33 Correlación entre PM10 y PM2,5

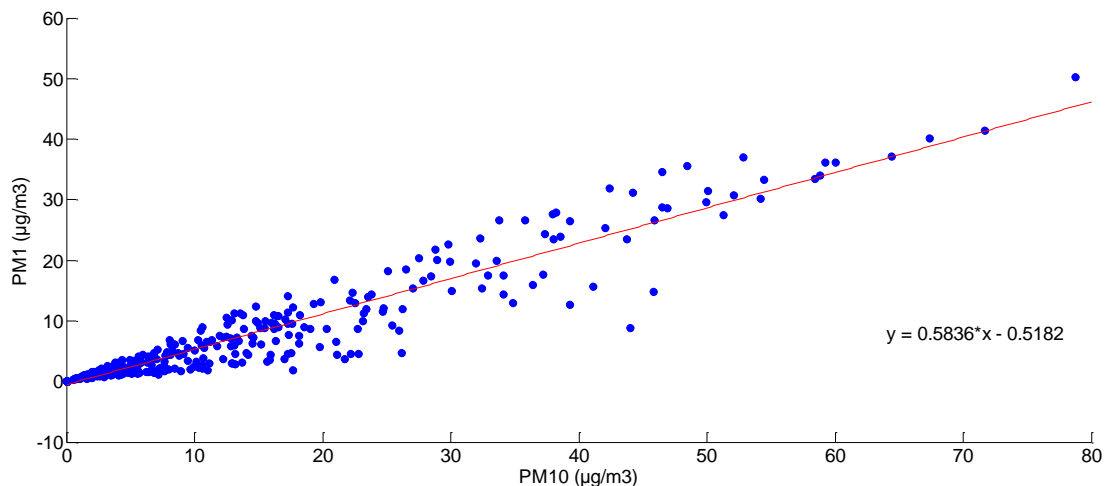


Figura 4-34 Correlación entre PM10 y PM1

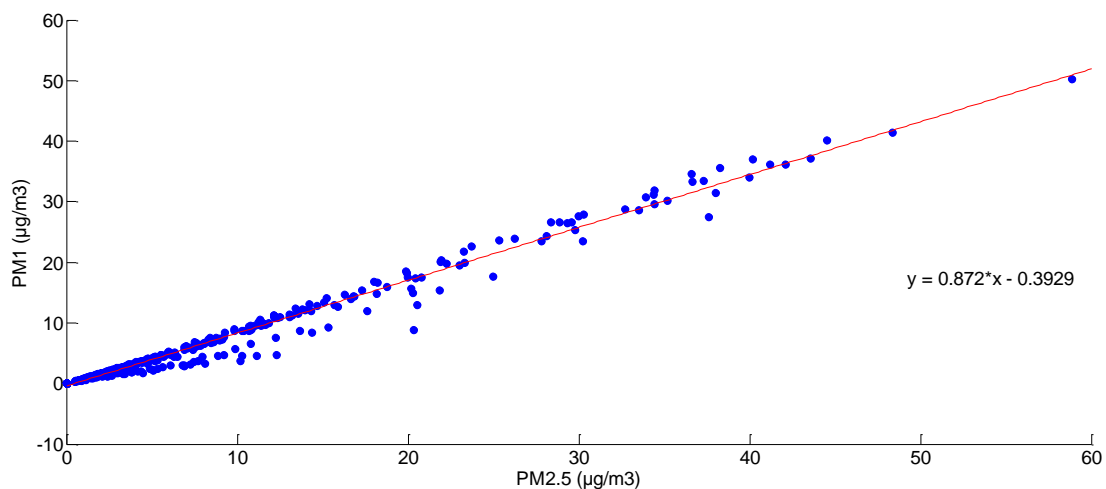


Figura 4-35 Correlación entre PM1 y PM2,5

Este análisis permite establecer que la relación entre PM2.5 y PM10 presenta la mayor similitud con la relación entre el AOT del modo fino y el total, lo que sugiere de conocerse los datos de AOT, se podría aproximar la fracción de PM10 que corresponde al PM2.5 para esta zona durante el mismo periodo de tiempo. Otro aspecto que puede considerarse para vincular el PM2.5 medido, con el modo fino de aerosoles, se aprecia en la figura 4-35, que muestra que alrededor del 85% del PM2.5 corresponde realmente a PM1.0 (diámetro de partícula menor a  $1\mu\text{m}$ ), el cual realmente corresponde al tamaño de las partículas consideradas finas desde el punto de vista de la fotometría solar.

De otra parte, establecer una correlación entre la fracción de EC y el AOT del modo fino o la concentración de PM<sub>2.5</sub> o PM<sub>1.0</sub> permitirá entender la utilidad que tienen las técnicas de sensado remoto para caracterizar la contaminación atmosférica en las zonas donde no se cuentan con redes de monitoreo como la RMCAB. Infortunadamente, como resultado de la campaña de monitoreo y de muestreo, no se cuentan con datos de distribución de AOT entre finos y gruesos, que coincidan con los días para los que se tienen datos de concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>1.0</sub>, lo que nos impide establecer dicha correlación. Cabe destacar, que los datos de AOT que no se lograron obtener para realizar este análisis, no se tienen debido a que las condiciones de nubosidad de la ciudad durante los días de la campaña, reducen de manera importante el número de datos que alcanzan el nivel 2.0 que son los empleados para todos los análisis presentados en este estudio.



## 5. Conclusiones y perspectivas

Durante la campaña de monitoreo realizada como parte de esta investigación, se realizaron las primeras mediciones de fotometría solar en Colombia, específicamente en Bogotá. En adición a la nueva y valiosa información obtenida sobre el contenido y propiedades de los aerosoles sobre Bogotá, este esfuerzo reveló la enorme dificultad de realizar fotometría solar en Bogotá, debido principalmente a la gran extensión espacial y temporal de la cobertura nubosa sobre la ciudad. La larga duración de los cielos cubiertos (a pesar de existir pequeños espacios entre las nubes), dificulta las mediciones solares directas, que permiten obtener propiedades como el espesor óptico de aerosoles (AOT) y el exponente de Angstrom (AE). Adicionalmente, la gran extensión de las nubes dificulta las mediciones solares indirectas, a través de las cuales se obtienen datos de almucantar y plano principal, que constituyen la base de las distribuciones de tamaño de partícula y otros productos de inversión que la técnica permite obtener. Por lo anterior, se puede concluir que, a pesar del valor de las mediciones obtenidas, la fotometría solar no es la técnica más apropiada para monitoreo continuo y vigilancia de la contaminación por material particulado en Bogotá. Las mediciones son sin embargo viables para propósitos científicos.

Se obtuvo un AOT promedio a 500 nm de  $0.13 \pm 0.11$ , el cual caracteriza a Bogotá como un sitio de contaminación “promedio” pero con una enorme variabilidad (“limpio”, “contaminado”, “no clasificado”), en gran parte explicable por la alta variabilidad atmosférica durante el periodo de medición, incluyendo una temporada húmeda anómala (más seca de lo esperado).

En el caso de exponente de Angstrom (AE a 500nm) el valor promedio encontrado fue de  $1.27 \pm 0.25$  el cual confirma la presencia predominante de partículas finas en la atmósfera, probablemente asociadas a fenómenos de combustión incompleta, por ejemplo proveniente de vehículos diesel, los cuales constituyen una de las principales fuentes de material particulado en la ciudad.

El análisis conjunto de los resultados obtenidos de AOT y de AE, permite concluir que el tamaño de las partículas en Bogotá es mucho menos variable que la carga de las mismas en la atmósfera, lo que sugiere fuentes relativamente constantes.

Se evidenció un dominio del modo fino en el AOT, lo cual es coherente con las características de Bogotá, como sitio con contaminación principalmente de origen antropogénico.

La relación de AOT y AE, indica la presencia de aerosoles continentales y antropogénicos. Por su parte los niveles de AOT clasifican internacionalmente la atmósfera como “ligeramente contaminada”, lo cual contrasta con la percepción pública. La fotometría solar no permite estimar la distribución vertical del espesor óptico de aerosoles. El contraste entre las

concentraciones de material particulado en la capa de superficie y los niveles de AOT sugiere que la mayor parte del material particulado se acumula en la capa de mezcla.

Por primera vez se midieron distribuciones continuas de tamaño de partícula en Bogotá entre 100 nm y 30  $\mu\text{m}$ . Sistemáticamente se observan diámetros modales de 0,25  $\mu\text{m}$  y 10  $\mu\text{m}$ .

Las mediciones muestran una muy buena correlación (en términos comparativos) del AOT con PM10, lo que abre la posibilidad al monitoreo satelital regional. Se debe tener en cuenta, al igual que con la fotometría solar, la persistencia de la cobertura nubosa en el área metropolitana también representa un obstáculo para dicha técnica.

En el análisis de las muestras de PM10 se logró recuperar en promedio el 55% de la masa total colectada (el 45% restante probablemente está constituido por metales y otros elementos no analizados). El ~50% de lo recuperado corresponde a carbono orgánico (OC), el ~30% es carbono elemental (EC) y lo restante son aniones y cationes. Aproximadamente el 30% de OC es soluble en agua (indicador del estado de oxidación).

El análisis de la distribución de las fracciones de carbono soluble, insoluble y elemental, indica bajos niveles de oxidación lo que sugeriría que el material particulado es esencialmente primario, es decir emitido directamente a la atmósfera.

Se estableció que la relación PM10 – PM2.5 presenta una buena similitud con la relación existente entre el AOT total y el AOT para el modo fino, y a su vez, la correlación PM1 – PM2.5 muestra que el PM1 constituye aproximadamente el 85% del PM2.5. Al interpretar estos dos resultados se puede entender porque la similitud entre la concentración de PM2.5 y el modo fino de AOT, entendiendo que las partículas cuyo diámetro es inferior a 1  $\mu\text{m}$  se consideran finas para la fotometría solar.

Finalmente y a manera de conclusión general y perspectiva, se lograron obtener los primeros resultados de fotometría solar en Bogotá. Aunque las mediciones válidas no son abundantes, como lo serían en un sitio de baja nubosidad, estas revelaron nueva información sobre el comportamiento de los aerosoles atmosféricos sobre Bogotá, el cual es de manera inequívoca el principal problema de calidad del aire en la ciudad. Sin embargo, dadas las condiciones del cielo bogotano, no parece viable usar la técnica fotométrica con fines de monitoreo y vigilancia de la calidad del aire de la ciudad. Sin embargo, indiscutiblemente las mediciones realizadas y los datos obtenidos tienen un enorme valor científico, por lo que la expectativa es que el proyecto AERONET –Colombia logre efectuar mediciones en zonas del país donde la meteorología no haga tan complicada la labor. En cuanto al análisis de composición de material particulado, se logró obtener nueva información valiosa desde el punto de vista de la prevención y la mitigación de emisiones y por tanto para la salud pública.

## 6. Referencias

**Cazorla, J. E.** Shields, M. E. Karr, F. J. Olmo, A. Burden, and L. Alados-Arboledas, Technical Note: Determination of aerosol optical properties by a calibrated sky imager A., *Atmospheric Chemistry and Physics.*, 9, 6417–6427, 2009

**Chu, D. A.**, Y. J. Kaufman, G. Zibordi, J. D. Chern, J. Mao, C. Li, and B. N. Holben, Global monitoring of air pollution over land from the Earth Observing System-Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 4661, doi:10.1029/2002JD003179, 2003.

**Dubovik, O.**, B.N.Holben, T.F.Eck, A.Smirnov, Y.J.Kaufman, M.D.King, D.Tanre, and I.Slutsker, Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J.Atm.Sci.*, 59, 590-608, (2002)

**Dubovik, O.** and King, M. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105(D16):20673-20696. (2000)

**Dubovik, O.**, Smirnov, A., Holben, B., King, M., Kaufman, Y., Eck, T., and Slutsker, I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET). Sun and sky radiance measurements. *J. Geophys. Res.*, 105(D8):9791-9806. (2000).

**Dubovik, O.**, Holben, B., Eck, T., Smirnov, A., Yoram, J., Kaufman, Y., King, M., Tanré, D., and Slutsker, I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, 59:590-608. (2002a).

**Dubovik, O.**, Holben, B., Lapyonok, T., Sinyuk, A., Mishchenko, M., Yang, P., and Slutsker, I. Non spherical aerosol retrieval method employing light scattering spheroids. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10):1415. (2002b).

**Díaz R., A. M.**, *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias*. Serie Tesis Doctorales, Universidad de la Laguna. 2005-06.

**Eck, T.F.**, B.N.Holben, J.S.Reid, O.Dubovik, A.Smirnov, N.T.O'Neill, I.Slutsker, and S.Kinne, Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban and desert dust aerosols, *J. Geophys. Res.*, **104**, 31 333-31 350, 1999

**Estelles L. V.**, *Caracterización de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante fotometría solar*, Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Tesis Doctoral Universidad de Valencia, 2006

**Foster, P.**, Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, USA, 2007*

**Hess M. et al.**, "Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC" *Bulletin of the American Meteorological Society* 831 - 844 Vol.79, No. 5, May 1998.

**Holben, B.N.**, T.F. Eck, I. Slutsker, D. Tanré, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov. AERONET A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing Environ.* 66: 1-16, 1998

**Holben, B.**, Tanré, D., Smirnov, A., Eck, T., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W. W., Schafer, J., Chatenet, B., Lavenu, F., Kaufman, Y., Vande, J., Castle, Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karneli, A., O'Neill, N. T., Pietras, C., Pinker, R., Voss, K., and Zibordi, G., An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET. *journal of geophysical research*, vol. 106, NO. D11, pages 12,067-12,097, june 16, 2001

**Jaenicke, R.**, Kneip, T.J. and Lioy, P.J eds., "Natural Aerosols", *Aerosols: Anthropogenic and Natural, Sources and Transport*. The New York Academy of Sciences, 338. New York, EE.UU. pp 317-329, 1980.

**Jiang, X.**, *Literature Review: Aerosols and Hydrologic cycle*, Physical Climatology Course, The University of Texas at Austin, December, 2006

**Jiménez, R.** AERONET Colombia - Exploratory and long-term aerosol remote sensing in the Tropical Andes. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2010 (proposal submitted to and approved by NASA/GSFC)

**Kaufman, Y. J.**, Tanre, D., Holben, B. N., Mattoo, S., Remer, L. A., and Eck, T. F., Aerosol radiative impact on spectral solar flux at the surface, derived from principal plane sky measurements, *J. Atmos. Sci.*, 59(3), 635–646, 2002.

**Koелеmeijer, C.D.** Homan<sup>1</sup>, J. Matthijsen, Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe R.B.A., Atmospheric Environment 40 5304–5315, (2006)

**Khoshima M.**, Ahmadi-Givi F., Bidokhti A.A., Sabetghadam S., Impact of meteorological parameters on relation between aerosol optical indices and air pollution in a sub-urban area., Journal of Aerosol Science 68, 46–57, (2014)

**Nakajima, T.**, Tanaka, M., and Yamauch, T. Retrieval of the optical properties of aerosols from the aureole and extinction data. Appl. Opt., 22:2951-2959. (1983).

**Nakajima, T.**, Tonna, G., Rao, R., Boi, P., Kaufman, Y., and Holben, B. Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. Appl. Opt., 35(15):2672-2686. (1996).

**Obregón M. A.**, Estudio de los aerosoles en columna sobre Cáceres a partir de medidas radiométricas, tesis doctoral, Universidad de Extremadura, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, 2012

**Pachón, J.**, Sarmiento, H., Análisis espacio-temporal de la concentración de metales pesados en la localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia., Revista de Ingeniería Universidad de Antioquia, No. 47, pp. 120-133, 2008.

**Rivera, J.**, Eduardo B., Identificación de fuentes de contaminación por material partuclado en Bogotá., MSc thesis, Universidad de Los Andes, 2009

**Rosenfeld, D.**, U. Lohmann, G. B. Raga, C. D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, and M. O. Andreae. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? Science 321: 1309-1313, 2008

**Satheesh, S.K.** and V. Ramanathan. Large differences in tropical aerosol forcing at the top of the atmosphere and Earth's surface. Nature 405 (672): 60-63, 2000

**Schmid, B.**, Michalsky, J. J., Slater, D. W., Barnard, J. C., Halthore, R. N., Liljegren, J. C., Holben, B. N., Eck, T. F., Livingston, J. M., Russell, P. B., Ingold, T., and Slutsker, I. "Comparison of Columnar Water-Vapor Measurements from Solar Transmittance Methods," Appl. Opt. **40**, 1886-1896 (2001).

**Seinfeld, John H., S. N. Pandis., Atmospheric Chemistry and Physics: from Air Pollution to Climate Change.,1st ed., New York: John Wiley, 1998**

**Smirnov, A., Holben, B., Eck, T., Dubovik, O., and Slutsker, I.** Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database. *Remote Sens. Environ.*, 73:337{349. PII S0034-4257(00)00109-7., 2000.

**Sullivan, A. P., R. J. Weber, A. L. Clements, J. R. Turner, M. S. Bae, and J. J. Schauer,** A method for on-line measurement of water-soluble organic carbon in ambient aerosol particles: Results from an urban site, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L13105, doi:10.1029/2004GL019681. (2004)

**Toledano C.** *“Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación ‘El Arenosillo’ de la red AERONET”.* Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, España. 2005.

**Vargas F., Rojas N. Y., Pachon J. E., Russell A.G.,** PM10 characterization and source apportionment at two residential areas in Bogota Freddy A. *Atmospheric Pollution Research* 3, 72-80(2012)

**Vargas, F. A., Rojas, N. Y.,** Composición química y reconstrucción másica del material particulado suspendido en el aire de Bogotá, *Ingeniería e Investigación* 30 (2), 105-115, 2010

**WHO.** Urban outdoor air pollution database. Department of Public Health and Environment, World Health Organization, Geneva, 2011 (disponible en <http://www.who.int/phe> - citado 2011-09-26)

## 7. Anexos

### Anexo 1

Resultados preliminares de la aplicación del modelo balance de masa química (CMB) Modelo EPA CMBv8.2, para establecer las fuentes que caracterizan las emisiones de material particulado en Bogotá.

## Anexo 1

Resultados preliminares de la aplicación del modelo balance de masa química (CMB) Modelo EPA CMBv8.2, para establecer las fuentes que caracterizan las emisiones de material particulado en Bogotá.

