

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE MATERIAL ATMOSFÉRICO EN  
SUSPENSIÓN POR EL ARBOLADO DE UN CORREDOR VIAL DE LA LOCALIDAD  
DE KENNEDY (BOGOTÁ D.C.)**

**CARLOS ALBERTO APONTE APONTE**

**CÓDIGO: 20091180002**

**PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL EN LA  
MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN (ACUERDO 001 DE 2011)**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BOGOTÁ D.C.**

**ABRIL DE 2017**

**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE MATERIAL ATMOSFÉRICO EN  
SUSPENSIÓN POR EL ARBOLADO DE UN CORREDOR VIAL DE LA LOCALIDAD  
DE KENNEDY (BOGOTÁ D.C.)**

**CARLOS ALBERTO APONTE APONTE**

**CÓDIGO: 20091180002**

**DIRECTOR:**

**ING. CARLOS ALFONSO ZAFRA MEJÍA  
Ph.D. INGENIERÍA AMBIENTAL**

**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS  
FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSO NATURALES  
PROYECTO CURRICULAR DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BOGOTÁ D.C.**

**ABRIL DE 2017**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Director: Carlos Alfonso Zafra Mejía**  
**Ingeniero Civil**  
**Ph.D en Ingeniería Ambiental**

---

**Jurado: Martha Isabel Mejía De Alba**

---

**Jurado: Angela Parrado Roselli**

**Bogotá D.C., abril de 2017**

*“Las ideas emitidas por los autores son de exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente opiniones de la Universidad”*

*(Artículo 117, Acuerdo 029 de 1998)*

## DEDICATORIA

*A mis padres por forjar el espíritu inquebrantable, por llenar el corazón de sueños de libertad y ser compañeros incondicionales en este camino de la existencia.*

*A mi familia especialmente a quienes abrieron las puertas de su mundo para acoger mis delirios con calidez y afecto. A los que desde la distancia brindaron en los momentos de mayor oscuridad un poco de su luz infinita y esperanza.*

*A la Universidad y los compañeros de aquellos tiempos por la oportunidad de adentrar en este maravilloso mundo del saber.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor quiere agradecer al Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis subdirección técnica de Arbolado, por el suministro del inventario forestal de las localidades de estudio en esta investigación, a la Secretaria de Ambiente de Bogotá D.C. por la facilitación de los registros hora de partículas suspendidas totales (PST) de las estaciones de la RMCAB. De igual manera, quiero agradecer al profesor Miguel Eugenio Cadena, director del laboratorio de suelos de la Facultad de Medio Ambiente de la Universidad Distrital por el interés demostrado, la facilitación de los equipos y espacios necesarios para desarrollar la presente investigación, y al profesor Néstor Bernal por su colaboración e interés prestado.

De igual manera, expreso mi gratitud y agradecimientos al Ing. Carlos Alfonso Zafra Mejía, director de la tesis, por su dedicación, compromiso, interés y paciencia mostrada durante este proceso.

Finalmente, quiero agradecer a mis familiares y amigos, que con su apoyo incondicional hicieron posible la finalización de este trabajo, de igual manera a mis iniciales compañeros de tesis Lina y Camilo quienes desde sus perspectivas y amistad realizaron valiosos aportes en los borradores iniciales de este proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. ANTECEDENTES .....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Justificación .....	6
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo General .....	8
1.3.2 Objetivos Específicos .....	8
2. MARCO TEÓRICO .....	9
2.1 Fuentes de contaminación.....	9
2.1.1 Fuentes fijas .....	10
2.2.1 Fuentes móviles .....	10
2.3.5 Circulación, transporte, difusión y dispersión de contaminantes .....	12
2.4 Arbolado urbano .....	14
2.4.1 Retención del material particulado por el arbolado urbano .....	14
2.5 Efectos del material particulado sobre la salud .....	16
2.6 Estado del arte .....	17
2.6.1 Técnicas para evaluar la retención de PST por el arbolado .....	20
2.6.2 Selección de área de muestreo .....	20
2.6.3 Diseño y tiempo de muestreo.....	20
2.6.4 Toma de muestras y métodos utilizados .....	21
2.6.5 Análisis de información.....	22
2.7 Descripción de áreas de investigación.....	22
2.7.1 Ubicación de la localidad de Barrios Unidos.....	23
2.8 Normatividad y legislación asociada.....	24
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1 FASE 1: Determinación de áreas de investigación. ....	27
3.1.1 Delimitación del área de muestreo en Kennedy.....	27
3.1.3 Área de muestreo Simón Bolívar .....	29
3.2 FASE 2: Selección de árboles a muestrear .....	29
3.2 FASE 3: Recolección de información en campo. ....	31
3.3 Fase 4: Recolección de información en laboratorio .....	33
3.3.1 Manejo de muestras y procedimientos en laboratorio .....	33
3.4 FASE 5: Análisis estadístico de la información .....	37
3.4.1 Análisis de correlación de Spearman entre concentraciones de PST. ....	38

3.4.2	Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo. ....	38
3.4.2	Análisis de correlación de Spearman entre PST, la precipitación y velocidad del viento. ....	39
3.4.3	Análisis de retención de material particulado por especie. ....	39
3.4.5	Análisis de relación entre la retención de PST y el tipo y forma de superficie foliar. ....	39
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
4.1	Análisis de correlación entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo .....	41
4.1.1	Análisis de correlación entre las concentraciones de PST y PM <sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo .....	41
4.1.2	Correlación entre concentraciones de PST en especies vegetales y la estación de monitoreo Carvajal (Kennedy).....	42
4.1.3	Correlación entre concentraciones de PST en especies vegetales y la estación Simón Bolívar .....	44
4.1.4	Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo.....	45
4.1.5	Análisis de regresión para las concentraciones de PST .....	52
4.2	Comportamiento de las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo .....	54
4.2.1	Influencia de la precipitación y velocidad del viento sobre las concentraciones de PST. ....	56
4.3	Relación entre las concentraciones de PST y la dirección predominante del viento en Kennedy.....	63
4.4	Capacidad de retención de PST por las especies vegetales .....	64
4.4.1	Influencia de la precipitación en la retención de PST por las especies vegetales .....	66
4.4.2	Relación entre la retención de PST por la especie vegetal y su arquitectura foliar.....	69
4.5	Retención de PST a diferentes alturas por el arbolado en Kennedy .....	74
5.	CONCLUSIONES .....	77
6	RECOMENDACIONES.....	79
7	BIBLIOGRAFÍA .....	81

## ANEXOS

Anexo A. Normatividad asociada al proyecto de investigación .....	89
Anexo B. Cartografía y Registro fotográfico áreas de muestreo.....	91
Anexo C. Procedimientos de recolección de información en campo y laboratorio.....	100
Anexo D. Resultados de pruebas estadísticas.....	110

.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información de la estación de monitoreo de la (RMCAB) Carvajal Sony .....	28
Tabla 2. Información de la estación de monitoreo de la (RMCAB) Simón Bolívar. ....	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
Tabla 3. Características de la vía en estudio.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Tabla 4. Número de especies y árboles a muestrear en las dos zonas de estudio .....	30
Tabla 5. Variables en estudio y pruebas estadísticas utilizadas para el análisis de la información.....	40
Tabla 6. Coeficientes de correlación entre las concentraciones de PST y PM <sub>10</sub> de las estaciones de la RMCAB presentes en las zonas de estudio.....	42
Tabla 7. Valores de correlación de Spearman análisis general de las especies arbóreas muestreadas en Kennedy .....	43
Tabla 8. Valores de correlación de Spearman análisis espacial de las especies arbóreas en Kennedy.....	47
Tabla 9. Valores de correlación de Spearman análisis especial de las especies arbóreas en Barrios Unidos .....	50
Tabla 10. Valores de coeficientes de determinación de las especies muestreadas en las dos zonas de estudio.....	53
Tabla 11. Coeficientes de determinación entre concentraciones de PST promedio mensual de especies vegetales y estaciones de monitoreo en Kennedy y Barrios Unidos.....	53
Tabla 12. Resultados de prueba de Anova de Friedman de las concentraciones de PST .....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Distribución de las partículas en función de su diámetro.</i>	11
<i>Figura 2. Comportamiento de las emisiones por fuentes móviles en vías urbanas.</i>	13
<i>Figura 3. Hojas de <i>Tecoma stans</i> sin retención y con retención de material particulado</i>	15
<i>Figura 4. Estructura del tallo y de las hojas.</i>	16
<i>Figura 5. Diagrama de la metodología de investigación</i>	26
<i>Figura 6. Diagrama procedimiento de muestreo en campo.</i>	32
<i>Figura 7. Material particulado retirado de las muestras, listo para ser desecado.</i>	34
<i>Figura 8. Material particulado retenido por las muestras.</i>	35
<i>Figura 9. Resultado escáner de los folios muestreados.</i>	36
<i>Figura 10. Variación de las concentraciones de PST mensual de la especie <i>Ligustrum lucidum</i> con respecto al PST mensual de la estación Carvajal.</i>	43
<i>Figura 11. Vista en planta de la zona de estudio en Kennedy (Vía, Autopista Sur entre las Calle 45 sur y la calle 62ª sur, Barrio Las Delicias Bogotá D.C.)</i>	46
<i>Figura 12. Variación mensual de las concentraciones de PST de la especie <i>Tecoma stans</i> con respecto al PST de la estación Carvajal</i>	47
<i>Figura 13. Vista en planta del área de muestreo de las concentraciones de fondo de PST en el parque el lago Barrios unidos</i>	50
<i>Figura 14. Variación de las concentraciones de PST mensual la especie <i>Quercus humboldtii</i> en la zona centro de muestreo con respecto al PST mensual de la estación Simón Bolívar.</i>	51
<i>Figura 15. Precipitación acumulada mensual y velocidad del viento promedio mensual en Kennedy.</i>	56
<i>Figura 16. Variación de concentraciones de PST vs precipitación promedio móvil mensual</i>	58
<i>Figura 17. Variación de concentraciones de PST vs velocidad del viento promedio móvil mensual,</i>	58
<i>Figura 18. Precipitación acumulada mes y velocidad del viento promedio móvil mensual en Barrios unidos.</i>	60
<i>Figura 19. Variación de concentraciones de PST vs precipitación promedio móvil mensual</i>	61
<i>Figura 20. Variación de concentraciones de PST vs velocidad del viento promedio móvil mensual.</i>	62
<i>Figura 21. Capacidad de retención promedio de PST de las especies muestreadas en Kennedy</i>	65
<i>Figura 22. Capacidad de retención de PST de las especies muestreadas en Barrios Unidos</i>	65
<i>Figura 23. Retención de PST por las especies ubicadas en Kennedy durante los periodos húmedo y seco.</i>	67
<i>Figura 24. Retención de PST por las especies ubicadas en el parque el lago durante los periodos húmedo y seco.</i>	68
<i>Figura 25. Área foliar promedio de las especies muestreadas en Kennedy</i>	70
<i>Figura 26. Área foliar promedio de las especies muestreadas en Barrios Unidos</i>	71
<i>Figura 27. Relación largo máximo foliar (LMF), ancho máximo foliar (AMF) de las especies muestreadas en Kennedy y Barrios Unidos</i>	72
<i>Figura 28. Gráfico conjunto de puntos de categorías del análisis correspondencia de la forma, tipo de superficie foliar y retención de PST de las especies muestreadas en Kennedy y Barrios Unidos.</i>	73
<i>Figura 29. Retención de PST a distintas alturas por las especies muestreadas en Kennedy</i>	75

## INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en el entorno urbano es hoy uno de los principales problemas ambientales que encauzan el interés de las instituciones nacionales e internacionales encargadas de velar por el ambiente, así como de la comunidad científica mundial. Esto debido a la creciente preocupación por los impactos sobre la salud humana y el entorno natural ocasionados por el incremento de los contaminantes en el aire (Beltran, 2012).

En el ámbito colombiano la ciudad de Bogotá D.C., está catalogada como la ciudad con mayores niveles de contaminación atmosférica (Behrentz, 2009), siendo el  $PM_{10}$  el parámetro que más sobrepasa las concentraciones permitidas por la legislación vigente. Según los informes generados por la red de monitoreo de la calidad del aire de Bogotá (RMCAB), esta contaminación se encuentra directamente relacionada con las actividades humanas más que con los fenómenos naturales, siendo las fuentes móviles un factor importante con cerca de 1.572.711 vehículos y 402.657 motocicletas, las cuales emiten cerca de 1.152 (ton/año) equivalentes al 40 % de las emisiones de material particulado según la información reportada por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2015) (SDA, 2015).

En Bogotá la localidad de Kennedy hace parte del área industrial de la capital, lo cual junto con el creciente flujo vehicular origina altos niveles de material particulado, permitiendo declarar a la localidad como una fuente de contaminación alta según la resolución 0610 de 2010 (Ministerio de Medio Ambiente, 2010), mediante la cual se establecen los niveles de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. Con base a lo anterior, la presente investigación se adelantó desde el 08 de marzo hasta el 23 de agosto del 2015 en un corredor vial cercano a las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) de Kennedy área de

mayor contaminación por  $PM_{10}$  y un área de muestreo en la localidad de Barrios Unidos; esta última seleccionada como estación de las concentraciones de fondo. Con el fin de determinar si el estudio de las concentraciones de partículas atmosféricas suspendidas totales (PST) depositadas en el área foliar del arbolado presente en las zonas de muestreo, pueden ser un indicador complementario en la evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en zonas en donde no se cuente con estaciones automáticas de monitoreo.

Este análisis permitió inferir el grado de contaminación atmosférica en las áreas de estudio, la relación con las concentraciones reportadas por las estaciones de la RMCAB, la influencia de variables climáticas como la velocidad del viento, la precipitación y la capacidad de retención de material particulado de las especies muestreadas. De igual manera, los resultados obtenidos permitieron evidenciar como este tipo de muestreo puede ser una herramienta complementaria de monitoreo y diagnóstico de la calidad del aire desde el punto de vista mensual, es decir a mediano plazo.

Finalmente, este proyecto de investigación se encuentra estructurado en los siguientes capítulos: En el primer capítulo, denominado antecedentes, se presentó el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos de la investigación. Posteriormente, en el capítulo denominado marco referencial se encontrará el marco teórico con los elementos conceptuales, las experiencias nacionales e internacionales y el marco legal colombiano. En el capítulo 3, se describe el diseño metodológico utilizado para alcanzar los objetivos del proyecto. Seguidamente en el capítulo 4, se exponen los resultados obtenidos. Finalmente, el capítulo 5 presentó las conclusiones y recomendaciones generadas en la presente investigación.

## 1. ANTECEDENTES

### 1.1 Planteamiento del problema

Durante las últimas cuatro décadas en la ciudad de Bogotá D.C. se ha evidenciado un significativo deterioro de la calidad del aire, asociado principalmente a la densificación poblacional. Lo anterior causando un constante incremento de las fuentes fijas y móviles de contaminación atmosférica, que para el caso de las fuentes fijas se estiman unas emisiones de 1.400 Ton/año de material particulado y de 1.152 Ton/año son aportadas por las fuentes móviles. Estas últimas asociadas a 1.572.711 vehículos y 402.657 motocicletas para el año 2014 (SDA, 2015) (SDA, 2015).

Esta situación ha llevado a la Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá D.C. (SDA) a poner en funcionamiento una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (RMCAB), compuesta por 14 estaciones que permiten evaluar el comportamiento de la contaminación atmosférica, y velar por el cumplimiento de las normas de calidad establecidas en la resolución 610 de 2010 (Ministerio de Medio Ambiente, 2010). Esto permitió observar cómo la estación de la RMCAB ubicada en la localidad de Kennedy registró durante el periodo 2008-2014 los valores promedio hora más elevados de  $PM_{10}$  ( $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), esto concuerda con el Decreto 623 del 2011 (Alcaldía Mayor de Bogotá.D.C., 2011) en donde se clasificó a esta localidad como un área fuente de contaminación alta “Clase I” por material particulado menor o igual a 10 micras ( $PM_{10}$ ).

La contaminación atmosférica en esta localidad se encuentra asociada a una alta concentración de partículas en suspensión, originada a partir de fuentes tanto fijas (i.e., industriales) como móviles (i.e., tráfico vehicular). Estas últimas generan cerca del 70% de los contaminantes atmosféricos (CO, HC y  $NO_x$ ) Torres et al. (2012). Adicionalmente, se considera que en la localidad este tipo de contaminación atmosférica se intensificó especialmente en vías como la

Avenida Ciudad de Cali, Carrera 80, Carrera 76, Calle 33 sur, Avenida Primero de Mayo, Avenida 68, y Avenida de Las Américas (Alcaldía local de Kennedy, 2012). Por otro lado, la estación de monitoreo ubicada en el Parque Simón Bolívar de la localidad de Barrios Unidos clasificada según Decreto 623 de 2011 como área fuente de contaminación “Clase III” (i.e., de baja contaminación), registró los valores más bajos durante el periodo 2008- 2014, con una concentración media de  $PM_{10}$  de  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Por lo tanto, en la presente investigación esta estación fue seleccionada para determinar las concentraciones de fondo de partículas atmosféricas suspendidas totales PST durante el período de estudio.

La constante generación de material atmosférico por fuentes fijas y móviles en las áreas de investigación, favorecen la sedimentación y permanencia de los sólidos atmosféricos en suspensión (PST y  $PM_{10}$ ), en muchos casos en el mismo lugar de emisión, posibilitando la retención de éste por el arbolado urbano Jhosi et al. (2011). Esta retención de material particulado hace referencia a la función ejercida por los árboles para actuar como filtros de partículas del aire, la cual es determinada por las características distintivas de las hojas como el área foliar, rugosidad, superficies pubescentes, árboles de hoja perennes, caducas o compuestas y variables climáticas como la precipitación y velocidad del viento; las cuales influyen directamente en la retención del contaminante sobre la superficie foliar y en el aumento o reducción de las concentraciones de este en ambientes urbanos (Alcalá, 2010).

La función desempeñada por el arbolado urbano, en la mitigación e indicación de la contaminación por material particulado, es un tema de investigación a fortalecer en la ciudad de Bogotá. Al respecto, se han detectado en el país diversas investigaciones que demuestran como éste es esencial en la retención del material particulado, ampliamente evidenciado en los trabajos de Duran et al. (2009) y (Pulecio, 2010) este último adelantado en la ciudad de Bogotá D.C.

Si bien estas investigaciones aunque hacen un primer aporte metodológico sobre el sistema de muestreo y la eficiencia de las especies evaluadas en la retención de material particulado, no abordan el estudio de la capacidad indicativa del arbolado urbano en la determinación del grado de contaminación atmosférica por material particulado, limitando la utilización de esta capacidad como una herramienta preliminar y complementaria en la evaluación de la calidad del aire por contaminación atmosférica por PST y  $PM_{10}$  mediante el establecimiento de líneas de tiempo para el muestreo en zonas en las que no se puede realizar el monitoreo de forma directa.

A partir de lo anterior surgió la siguiente pregunta de investigación:

¿Existe correlación entre el material atmosférico particulado retenido en la superficie foliar de la vegetación vial y las concentraciones de PST registradas por las estaciones de calidad del aire cercanas?

## 1.2 Justificación

La calidad del aire es uno de los factores de importancia en la determinación del índice de calidad de vida de un centro urbano (Rojas, 2014), en este sentido se estima que los altos niveles de contaminación atmosférica por material particulado PST y  $PM_{10}$  en Bogotá D.C. son responsables del 20 % de las infecciones respiratorias agudas cada año (SDA, 2015). En respuesta a esta situación, las autoridades ambientales han incrementado su interés por la vigilancia, el control y reducción de las emisiones causadas por las diversas fuentes antropogénicas de contaminación. Lo anterior, mediante la implementación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y la expedición de la normatividad respectiva. Sin embargo, este sistema aún requiere del aporte de conocimientos y pruebas científicas que permitan diseñar planes complementarios para el mejoramiento de la calidad del aire, mediante la formulación de instrumentos y medidas novedosas de control.

Lo anterior, genera la necesidad de adelantar investigaciones que permitan la obtención de información cuantitativa y cualitativa sobre el comportamiento y respuesta a la contaminación, de los elementos presentes en el ecosistema urbano. En este sentido, la evaluación de la función de un elemento fundamental del ecosistema urbano como lo es el arbolado, con respecto a su papel como indicador de las concentraciones de material particulado en suspensión ( $PM_{10}$  y PST) en ambientes urbanos, mediante el estudio de las concentraciones de PST sobre la superficie foliar, es fundamental en la obtención de información de referencia en la identificación del grado de contaminación por material particulado y su distribución espacial en un área determinada Gayle et al. (2012).

El estudio del arbolado urbano como un elemento indicador de la contaminación atmosférica se ha venido empleando en los últimos años. Por ejemplo una investigación mexicana realizada por

Alcalá et al. (2010) identifica diferencias en la retención de material particulado por algunas especies del arbolado según el uso del suelo en San Luis Potosi (Mexico). Por otro lado en Italia Ugolini et al. (2013) evaluo la capacidad bioacumuladora de metales pesados (Zn, Pb, Cd, Cu, Fe, Mn, Cr) de la especie *Quercus ilex*, como un elemento indicador de captura y de posible distribución de estos en parques y corredores viales.

En este sentido la presente investigación se propone aportar elementos técnicos y metodológicos en el estudio de la capacidad indicativa de la contaminación atmosférica del arbolado urbano en Bogotá D.C. mediante el establecimiento de líneas de tiempo en el muestreo en áreas cercanas a las estaciones de la RMCAB con mayores y menos concentraciones de PST y  $PM_{10}$  posibilitando de esta manera el estudio de la variación temporal de la terención de PST por el arbolado, como de la relación entre el material particulado retenido por las especies arboreas y el grado de contaminación reportado por las estaciones de la RMCAB.

Adicionalmente, se pretenden visualizar criterios relevantes en el control de la contaminación atmosférica para considerarlos en la selección del arbolado en las áreas objeto de estudio. De igual manera, se aportan elementos metodológicos que contribuyen a contemplar el uso del muestreo de la superficie foliar de las especies arbóreas como un elemento de control de la contaminación atmosférica por material particulado en lugares en donde el monitoreo no se ha logrado implementar de forma directa. Lo anterior, por los elevados costos de adquisición y mantenimiento de los equipos de monitoreo, probablemente convirtiéndose en la principal limitante para la ampliación de la RMCAB en la Ciudad de Bogotá D.C.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Evaluar la retención de material atmosférico en suspensión por el arbolado ubicado en un corredor vial localizado en un área de alta contaminación atmosférica Clase I y un área de baja contaminación atmosférica Clase III de la ciudad de Bogotá D.C.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Evaluar la correlación entre el material atmosférico particulado (PST y  $PM_{10}$ ) retenido sobre la superficie de las hojas del arbolado y las concentraciones de PST y  $PM_{10}$  registradas por las estaciones de monitoreo de calidad del aire en las áreas de estudio.
- Estudiar la relación entre las concentraciones de material atmosférico particulado retenido sobre la superficie de las hojas del arbolado con la precipitación y velocidad del viento.
- Determinar la relación entre la cantidad de material particulado retenido sobre el área foliar y el tipo y forma de la superficie foliar.

## 2 MARCO TEÓRICO

Antes de inicio al análisis detallado de los resultados del presente informe, es fundamental dar claridad acerca del concepto de contaminación atmosférica, como de otros términos, que facilitaran la comprensión del contenido de este informe. La contaminación del aire urbano es el resultado de una agregación de fuentes de emisión que van desde las industrias y los automóviles hasta el uso de productos domésticos, incluida la vida animal y vegetal; que alteran la composición normal de la atmósfera generando problemas de salud pública y daños al mobiliario urbano existente (Zafra Megía, Palacio Soto, & Rodríguez Miranda, 2014)(Beltran, 2012)(Beltran, 2012). En las grandes ciudades como Bogotá D.C. esta contaminación es generada principalmente por las fuentes vehiculares y las industriales Tyler et al.(2013).

Asi mismo,se hace especial énfasis en que las normas de calidad de aire, buscan principalmente determinar los niveles de concentración máxima de contaminantes en el aire, durante un periodo definido, el cual es recomendable no exceder puesto que traería consigo riesgos en la salud humana (Ramos, 2006). Estos estándares son establecidos por organismos gubernamentales competentes en cada uno de los países. A continuación se profundizará en este tema.

### 2.1 Fuentes de contaminación

El aumento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en las ciudades se encuentra directamente relacionado con el incremento de las actividades económicas y sociales, más que con los fenómenos naturales. Lo anterior, principalmente por los procesos de combustión derivados de las fuentes fijas como las industrias y, fuentes móviles, como los automóviles en su diario desplazamiento por la malla vial (Espinosa, 2005).

### **2.1.1 Fuentes fijas**

La fuente fija se define como la fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa (Ministerio del Medio Ambiente, 1995). Estas se clasifican en (i) puntuales: aquella que emite contaminantes al aire por ductos o chimeneas; y (ii) dispersa: cuando los focos de emisión de una fuente fija se dispersan en un área por razón del desplazamiento de la acción causante de la emisión (Arciniégas C. S., 2011).

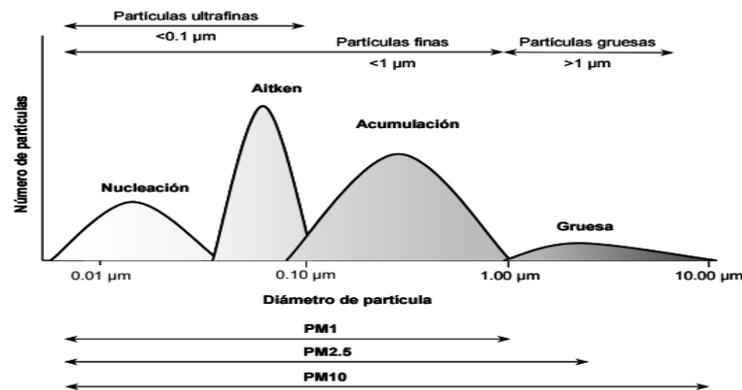
### **2.2.1 Fuentes móviles**

Estas se definen como aquellas fuentes que por razón de su uso o propósito son susceptibles de desplazarse según Tyler et al. (2013). Dentro de estas fuentes de emisión se encuentran los vehículos automotores, vehículos ferroviarios o motorizados, aviones, y maquinarias no fijas con motores de combustión y similares, que en su operación emitan o puedan emitir contaminantes a la atmósfera. De igual manera, se ha demostrado que gran parte de las emisiones generadas por esta fuente son consecuencia de la re-suspensión (i.e., polvo que se levanta por el tránsito vehicular) y de la abrasión (i.e., desgaste de la superficie de las calles y del caucho de las llantas de los vehículos), como lo señala (Beltran, 2012). Se estima que en Bogotá estas fuentes móviles aportan más del 80 % de las emisiones de monóxido de carbono, dióxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, el 77 % de los óxidos de nitrógeno y el 36 % del material atmosférico particulado menor a 10 micras (Belarcazar & Manzini, 2007).

### **2.3 Material particulado (MP)**

Este se encuentra constituido, principalmente por partículas de carbón no quemado, sulfatos, nitratos, amonio, cloro, y partículas de metales como hierro, mercurio y plomo que al ser emitidas permanecen suspendidas en el aire. Dependiendo del tamaño, éstas se clasifican en

partículas con diámetros entre 10 y 100 micras (PST), partículas con diámetro por debajo de 10 micras (PM<sub>10</sub>), y partículas con diámetros inferiores a 2.5 micras (PM<sub>2.5</sub>) (Ministerio del Medio Ambiente, 1995). Generalmente, se identifican diferentes rangos de tamaños de partículas denominados "modas", que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa como se muestra en la figura 1.



*Figura 1. Distribución de las partículas en función de su diámetro.*

*Fuente: Tomado de (Arciniégas C. S., 2011)*

### 2.3.1 Moda de enucleación (< 0,02 µm)

La mayor concentración en número de partícula se encuentra entre 5 nm-15 nm. Los únicos precursores gaseosos con capacidad para formar partículas por nucleación homogénea en aire ambiente son H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NH<sub>3</sub>. La vida media de estas partículas en la atmósfera es del orden de horas, ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación (Kulmala, 2001).

### 2.3.2 Moda Aitken (0,02-0,1 µm)

Estas partículas pueden tener un origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de partículas de la moda de nucleación). Aún se desconoce sobre la composición química de estas partículas, aunque es muy probable que las de origen secundario se formen por procesos de

coagulación a partir de la moda de nucleación, por condensación y por reacciones en fase líquida con compuestos inorgánicos (Arciniégas C. S., 2011).

### **2.3.3 Moda de acumulación (0,1-1 $\mu\text{m}$ )**

La mayor densidad de partículas se registra entre 150 nm-250 nm. En la atmósfera las partículas de la moda Aitken crecen hasta formar parte de la moda de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que tienen lugar en gotas de agua en las nubes. El tiempo de residencia en la atmósfera es máximo para las partículas de esta moda (Kulmala, 2001).

### **2.3.4 Moda gruesa (> 1 $\mu\text{m}$ en términos de aerosoles atmosféricos)**

Comprende las partículas de diámetro > 2,5  $\mu\text{m}$ , se caracterizan por presentar un reducido número de partículas pero una elevada masa. Otra característica esencial de las partículas en lo concerniente a sus efectos en el medio natural, principalmente en el caso de los vegetales, se encuentra asociado con su forma ya que si las partículas son de tendencia esférica tendrán más posibilidad de penetrar en los estomas, que si son filamentosas o ramificadas. Por el contrario, estas últimas tendrán más facilidad para adherirse a las superficies foliares y obturar exteriormente los huecos de intercambio de gases (Mariano, 2002).

### **2.3.5 Circulación, transporte, difusión y dispersión de contaminantes**

La incorporación de los contaminantes a la circulación general de la atmósfera se encuentra regida por los movimientos horizontales de las masas de aire, en los que se refiere a la velocidad, y sentido de las corrientes troposféricas y estratosféricas. Por otra parte, ocurren y existen movimientos verticales que engendran una circulación atmosférica denominada célula de Hadley, al combinar los vientos de oeste con la deriva ascensional, el resultado final es el intercambio de masas de aire entre el hemisferio norte y el hemisferio sur a nivel troposférico de

las zonas ecuatoriales, lo cual determina la circulación y dispersión de los contaminantes en la troposfera (Seoanez, 2002). La turbulencia y difusión de contaminantes en la atmósfera se define como un movimiento caótico desordenado y aleatorio, lo cual causa mezclas intensas de aire originando fenómenos de dilución y por ende, de reducción de la concentración de los contaminantes (Harrison, 2003). A escala local la calidad del aire se encuentra influenciada de manera notoria por la velocidad de mezcla de los contaminantes que son emitidos, esto permite evidenciar cómo en general, una baja velocidad del viento posibilita altas concentraciones de contaminantes y viceversa (Universidad de Chile, 2004).

Otro elemento importante a considerar es la rugosidad de la superficie de la tierra, esta produce cierta cantidad de turbulencia en la capa límite de la atmósfera que activa la mezcla y dispersión de contaminantes. Este efecto se incrementa con la magnitud de la rugosidad de la superficie y es mayor en los centros urbanos (OMS, 2004), siendo ésta junto con el gradiente de temperatura los factores que más influyen en la turbulencia (Harrison et al., 2003). Finalmente, la dispersión de las emisiones locales dentro de los “cañones” urbanos se encuentra limitada por la dificultad de mezcla con aire limpio exterior. Así pues, la concentración de contaminantes puede aumentar significativamente generando su persistencia y precipitación en el área de emisión y en áreas aledañas como se puede observar en la Figura 2.



**Figura 2.** Comportamiento de las emisiones por fuentes móviles en vías urbanas. Adaptada de (Torres & Rodríguez, 2012). Fotografía tomada en mayo 31/2015 en la Autopista sur entre carreras 61<sup>a</sup> y 62<sup>b</sup>. Área de muestreo en la localidad de Kennedy.

## **2.4 Arbolado urbano**

El arbolado urbano se define como el conjunto de plantas de las especies correspondientes a los biotipos árbol, arbusto, palma o helecho arborescente, ubicados en suelo urbano según Decreto 531 de 2010 de la Alcaldía de Bogotá D.C. (SDA, 2015) (SDA, 2015). Como uno de sus principales objetivos, la arborización articula a la ciudad con las zonas rurales circundantes, generando conectividad y contribuyendo a mejorar la calidad del aire, del paisaje y produciendo un ambiente de bienestar emocional a los ciudadanos al incorporar características naturales al entorno artificial (Anze & Fraken, 2007).

### **2.4.1 Retención del material particulado por el arbolado urbano**

La retención del material particulado hace referencia a la “función ejercida por los árboles de actuar como filtros, reduciendo la cantidad de partículas dañinas de importancia, siendo retenidas por la superficie del árbol y su follaje, como resultado de los efectos de la fuerza de gravedad y estabilidad atmosférica (Nowak, 2006). De igual manera, esta cantidad de sólidos depositados se encuentra en función de la cantidad, del tamaño del contaminante y forma de las partículas, como de las condiciones atmosféricas y la superficie receptora (Alcalá, 2010).

La cantidad de material depositado fluctúa según el tamaño de la partícula, por variaciones espaciales (área urbana o suburbana), y temporales (mayor y menor precipitación) (Duran Rivera, 2009). La mayor retención de material particulado por el arbolado es ejercida por el follaje, esto debido a que las hojas representan la mayor cantidad de superficie, favoreciendo la deposición en forma de sedimentación seca como se muestra en la Figura 3.



*Figura 3. Hojas de Tecoma stans sin retención y con retención de material particulado atmosférico*  
Fuente: Autor.

### 2.4.2 Morfología foliar

Las hojas son los apéndices laterales aplanados del tallo y se originan en los primordios foliares de las yemas. Cada primordio<sup>1</sup> foliar se contrae y comienzan a diferenciarse en dos partes: una porción basal llamada hipopodio<sup>2</sup> y una porción apical llamada acrofilo<sup>3</sup>. El hipopodio origina la base foliar y las estípulas. El acrofilo origina la lámina o limbo (cuando existe) del pecíolo (Dimitri & Orfila, 1980). Las hojas además de la fijación de carbono e intercambio gaseoso a partir de los procesos de fotosíntesis y transpiración favorecen la remoción de partículas absorbiéndolas o reteniéndolas sobre la superficie.

De igual manera, la arquitectura que conforman las hojas hace posible una mejor retención y acumulación de las partículas en suspensión, ya que las hojas con excrecencias, pelos, exudaciones o relieve muy accidentado pueden retener el polvo mucho mejor que las hojas coriáceas, lisas y sin ceras protectoras. De igual manera, las hojas con pecíolo delgado y largo recogen las partículas en menor cantidad que las hojas con pecíolo corto y grueso, pues el viento las mueve menos (Smithsonian, 1999). Otra característica determinante es el área foliar, ya que a mayor área y número de hojas se incrementa la posibilidad de intercepción de material

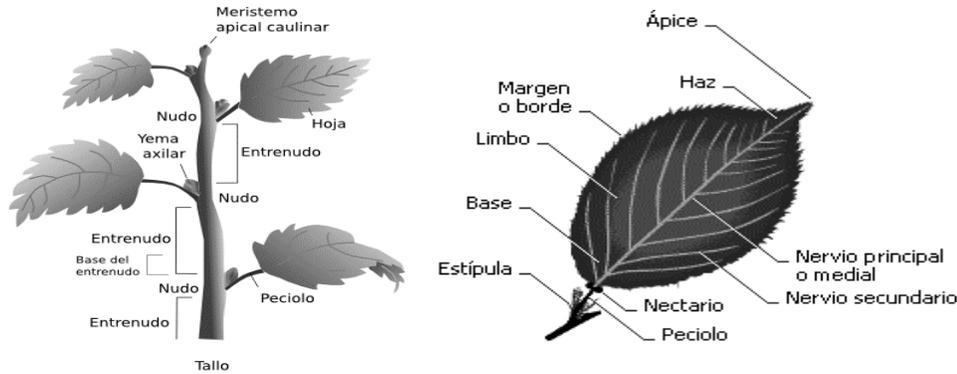
---

<sup>1</sup> Prominencia lateral del ápice del brote, que da lugar a la hoja.

<sup>2</sup> Parte inferior del primordio.

<sup>3</sup> Parte superior del primordio.

particulado por el arbolado (Cabezas, 2009). En la figura 4 se presentan algunas características físicas de las hojas y el tallo.



*Figura 4. Estructura del tallo y de las hojas.*

Fuente: (Curtis Helena, 2008)

## 2.5 Efectos del material particulado sobre la salud

Las distintas partículas que conforman el material particulado atmosférico pueden causar efectos tóxicos de las siguientes maneras (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006):

- ✓ La partícula puede ser intrínsecamente tóxica debido a sus características químicas o físicas.
- ✓ La partícula puede interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio humano.
- ✓ La partícula puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida.

Los factores relevantes en el sistema respiratorio para la absorción de los contaminantes presentes en las partículas atmosféricas son su tamaño y solubilidad en agua. Adicionalmente, las características de las vías respiratorias podrían favorecer la deposición de partículas en sus

paredes (Moreno, 2003). Según Peña et al. (2001) las partículas que poseen tamaños comprendidos en el intervalo entre 2,5  $\mu\text{m}$ –10  $\mu\text{m}$  se depositan directamente en la tráquea, bronquios y bronquiolos. De igual manera, Moreno et al. (2003) señalan que las partículas con tamaño inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  llegan al interior de los alvéolos pulmonares, donde las más hidrosolubles se disuelven y las menos hidrosolubles se depositan.

En el caso de la ciudad de Bogotá D.C., un estudio realizado por la Pontificia Universidad Javeriana evidenció relación entre las concentraciones de partículas respirables en el medio local y las enfermedades respiratorias en niños menores de 14 años. La investigación reportó un incremento del número de consultas médicas relacionadas con el sistema pulmonar (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006) (Ramos C. F., 2006). Igualmente, Sánchez et al. (2006) demostraron que a nivel nacional más del 30% de los casos se presentaron en Bogotá y más del 20% en ciudades con menos de un millón de habitantes.

## **2.6 Estado del arte**

El estado del arte relacionado con el tema de investigación es una breve abstracción de las principales bases de datos a nivel internacional como nacional. Dentro de las investigaciones más destacadas se encuentra como en el año de 1997 en la provincia de Mendoza (España), Dalmansson et al. (1997) desarrollaron la investigación titulada, la vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. La cual realiza una primer aproximación cuantitativa a la contaminación atmosférica causada por cementeras en las inmediaciones del municipio de Malagueño La Calera, Córdoba, mediante el análisis del polvo depositado en las hojas de la vegetación, permitiendo de esta manera inferir el grado de contaminación atmosférica por material particulado y la distribución de ésta en las áreas aledañas a las cementeras. Lo anterior,

permite plantear por primera vez la utilización de las especies arbóreas como un elemento indicador de la contaminación atmosférica por material particulado en la evaluación ambiental.

Así mismo, se encontró como Alcalá (2010) adelantó la investigación titulada “Potencial de retención de polvo atmosférico en tres especies vegetativas de San Luis Potosí, México”, la cual aborda permite asociar el uso del suelo y las concentraciones material particulado depositado sobre por las superficies foliares de las tres especies muestreadas. .

Por otro lado, en Estados Unidos Steffens et al. (2012) adelantó una investigación dirigida a construir “un modelo para evaluar los efectos de las barreras de vegetación en las distribuciones de tamaño de partículas en un entorno cercano a la carretera”. Esta, investigación permite hacer un primer aproximamiento a la capacidad mitigadora del arbolado en la reducción del material particulado en resuspensión en corredores viales. De igual manera, durante este mismo año Hagler (2012) adelantó una investigación dirigida a evaluar la capacidad de las barreras de vegetación de las vías para concentrar partículas ultra finas a diferentes condiciones de viento, demostrando como una velocidad media del viento es un factor determinante en la retención de material particulado por el arbolado en presente en corredores viales.

En Italia, se realizó una investigación dirigida por Ugolinia et al. (2013), titulada “*Quercus ilex L* como bioacumulador de metales pesados en zonas urbanas”, la cual fue realizada en la ciudad de Florencia (Italia), con el fin de demostrar como los árboles en zonas urbanas tienen un papel importante en la retención de metales pesados a través del follaje, tallos, y como la acumulación de contaminantes en la superficie y los tejidos de las plantas deben ser considerados como un indicador de la contaminación del aire, permitiendo ser utilizados en los protocolos de monitoreo.

Por otro lado, en Colombia, en el año 2008 se realizó una investigación por el Grupo de Estudios Florísticos de Ingeniería Ambiental de la Universidad Católica de Rionegro (Antioquia), titulada “Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos localizados en áreas de alta contaminación en el Valle de Aburra, para determinar el potencial de retención y las especies con mayor capacidad de captura de material particulado. El estudio permitió concluir que 3 de las 5 especies evaluadas realizaron la mayor capacidad de retención de material particulado.

Un año después, Hermiso Pulecio (2010) adelantó un estudio para el Jardín Botánico de Bogotá titulado “Realización y validación de un protocolo para el cálculo de material particulado en follaje, aplicado a 9 especies arbóreas en áreas de mayor contaminación de la ciudad (i.e., Puente Aranda, Font ibón, Tunjuelito, Kennedy y la zona centro)”, dirigido a determinar las especies con mayor capacidad de retención de material particulado  $PM_{10}$ . En esta investigación se trabajó con cerca del 5% de las especies arbóreas relacionadas en el censo del arbolado urbano de la ciudad. Los resultados identificaron como 3 de las 9 especies muestreadas realizaron la mayor captura de material particulado.

Finalmente, se encontró como Ramos (2012) adelanto la investigación titulada “Flujo Vehicular y Respuestas Eco-Fisiológicas del Arbolado urbano En Bogotá D.C.”. Si bien el objetivo de esta investigación no fue determinar diferencias en la retención de material particulado entre especies, se demostró como la acumulación de material particulado sobre las hojas del arbolado, fue en promedio cinco veces superior en vías de alta movilidad vehicular en relación a sitios de control (área con vajos niveles de contaminación por material particulado).

### **2.6.1 Técnicas para evaluar la retención de PST por el arbolado**

Las distintas investigaciones adelantadas para identificar la capacidad de retención de material particulado por el arbolado presente en áreas urbanas, industriales y mineras, contienen técnicas y métodos desarrollados en cuatro etapas, las cuales se presentan a continuación.

### **2.6.2 Selección de área de muestreo**

Las áreas de muestreo fueron definidas según los objetivos planteados en la investigación, por ejemplo si ésta buscó caracterizar la contaminación atmosférica generada por una fuente de tipo puntual. Al respecto, Dalmasson et al. (1997) delimitó el área de muestreo en forma de círculos, conformados por tres sectores subsecuentes. Sector 1, de 0,0 m a 2,0 m de distancia con respecto de la fuente de emisión; sector 2, entre 200 m y 1.000 m, y sector 3 entre 1.000 m y 3.000 m. Si por el contrario se planteó evaluar la retención de material particulado por el arbolado en ambientes urbanos para caracterizar las emisiones generadas por fuentes lineales o áreas fuentes, Moreno (2008) y Duran et al. (2009) delimitaron el área de muestreo mediante polígonos en zonas de mayor contaminación atmosférica; o como lo señaló Alcalá et al. (2010), mediante la selección de un tramo de carretera según las condiciones ecológicas y usos de suelo. Finalmente, Gayle et al. (2012) y Uglolina (2013) definieron el área de muestreo en ambientes urbanos mediante la delimitación de un transepto a lo largo de la vía en estudio en las áreas de mayor contaminación atmosférica de la ciudad.

### **2.6.3 Diseño y tiempo de muestreo**

En la totalidad de los estudios se ha encontrado el uso de un diseño de muestreo aleatorio simple (MAS) para la selección de los individuos, a excepción de Gayle et al. (2012) quienes realizaron la medición de la retención de PST por el arbolado a lo largo de un corredor vial con la

utilización de vehículos instrumentados con equipos de ultrasonido en tres dimensiones (3D) y anemómetros, tomando mediciones a 3,0 m y 7,0 m de altura durante un periodo de dos semanas en el otoño y posteriormente a finales del otoño e invierno. Finalmente, los periodos de muestreo de las investigaciones se caracterizaron por repeticiones en temporadas con mayores y menores precipitaciones, con 2 o 3 repeticiones entre estos períodos de tiempo.

#### **2.6.4 Toma de muestras y métodos utilizados**

La toma de muestras se caracterizó por la recolección de folios expuestos, en rangos de altura entre 1,50 m y 2,50 m de distancia desde el suelo Hagler et al. (2012). El número de muestras recolectadas varió según la relación que se buscó establecer con respecto a la capacidad de retención de las especies. Si se quiere establecer una relación entre concentraciones de material particulado y área foliar ( $\text{mg}/\text{m}^2$ ), se colectaron entre 15 y 20 hojas por árbol al azar como se puede evidenciar en Pignata (2003) y Dalmansson et al. (1997).

Si se busca establecer una relación entre la cantidad de material particulado y materia seca ( $\text{mg}/\text{kg}$ ), como se encuentra en Alcalá et al. (2010), se colectan entre 40 y 50 gramos de hojas en cada árbol muestreado. Posteriormente, las muestras colectadas fueron almacenadas a una temperatura de 4 °C para ser trasladadas al laboratorio. Una vez en laboratorio, los folios fueron sometidos a un tratamiento de lavado con agua desionizada para el retiro del material particulado; el cual fue depositado en papel filtro previamente tarado para ser llevado a estufa de aire forzado a 60 °C durante 48 horas. Posteriormente, se calculó la cantidad de PST retenido por las superficies foliares mediante una prueba gravimétrica.

Adicionalmente, se encontró como Duran (2009) utilizó un método en el cual depositó el material particulado retirado en frascos de vidrio previamente tarados, para su posterior

dsecación en estufa a 80 °C durante 72 horas; calculando finalmente la cantidad de PST retenido por las superficies foliares por diferencia de pesos.

Finalmente, la determinación del área foliar se realizó con la utilización de un escáner LI-COR Modelo LI-3000A® (Alcalá et al., 2010), o mediante la toma de fotografías con escala de referencia; las cuales se analizaron en el software libre ImageJ para la determinación del área foliar según lo expuesto en Rincón (2012).

### **2.6.5 Análisis de información**

Los valores obtenidos de las variables en estudio fueron sometidos a pruebas de normalidad mediante el test de Kolmogorov- Smirnov y de Chi cuadrado. De igual manera, se estimaron intervalos de confianza al 95% para las concentraciones medias de material particulado en cada sector muestreado, como se evidencia en lo expuesto por Steffens et al. (2012).

## **2.7 Descripción de áreas de investigación**

### **2.7.1 Ubicación de la localidad de Kennedy**

Kennedy es la octava localidad, situada en la parte occidental de Bogotá D. C. con una elevación media de 2.559 m.s.n.m. y una posición geográfica de latitud norte 4° 09' 11,68" y longitud Oeste 74° 09' 20,65". La localidad limita al norte con la localidad de Fontibón, teniendo el río Fucha y la Calle 13 como límite; al sur limita con las localidades Bosa y Tunjuelito, siendo delimitada por la Autopista Sur, el río Tunjuelo y la Avenida Calle 40 sur. Al oriente limita con la localidad de Puente Aranda, siendo separada por la Avenida 68. Finalmente, al occidente limita con el municipio de Mosquera a través del río Bogotá. La localidad de Kennedy cuenta con una extensión de 3.786,16 hectáreas, de las cuales el 98 % son urbanas y el 1,8 % rurales. En relación al área del Distrito capital, la localidad representa el 1,12 % de su área, siendo la tercera zona en

extensión territorial y la primera en población con 1.500.000 habitantes equivalentes, al 19,23% del total de la población de la ciudad de Bogotá D.C. (Secretaria Distrital de Gobierno, 2015).

### 2.7.1.2 Estación Carvajal-Sony

La Tabla 1 presenta las características de la estación de monitoreo de la RMCAB en Kennedy.

**Tabla 1.**

*Datos Estación de monitoreo de la (RMCAB) Carvajal Sony.*

<b>Ubicación:</b>	<b>Autopista Sur N° 61- 40</b>	
<b>Propiedad:</b>	SDA	
<b>Propósito:</b>	Monitoreo Calidad del aire.	
<b>Latitud:</b>	4° 35`45,09”	
<b>Longitud:</b>	74° 08`54,60”	
<b>Altura punto de muestreo :</b>	10 m	
<b>Parámetros de medición</b>	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub> , O <sub>3</sub> , CO, SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub> PST.	
<p>Observación: La estación se encuentra ubicada sobre la azotea de una de las edificaciones de la empresa Gaseosas Postobón, a 36 m de la autopista sur.</p>		

### 2.7.2 Ubicación de la localidad de Barrios Unidos

Barrios Unidos es la localidad número doce, situada al noroccidente de la ciudad de Bogotá D.C. con una elevación media de 2.605 m.s.n.m. y una posición geográfica de latitud norte 4° 39` 38,31” y longitud Oeste 74° 05` 12,86”. La localidad limita al occidente con la Avenida carrera 68, que la separa de la localidad de Engativá. Al sur limita con la calle 63 que la separa de la localidad de Teusaquillo; al occidente limita con la localidad de Suba y al oriente con la Avenida Caracas que la separa de la localidad de Chapinero (Secretaria Distrital de Gobierno, 2015). Barrios unidos cuenta con una extensión total de 1.189,52 hectáreas, todas ellas en el área urbana, las cuales representan el 1,39 % del total del área de la ciudad; siendo la quinta localidad

con menor extensión en el Distrito Capital. Posee una población estimada en 254.162 habitantes equivalentes al 3,2 % de la población total de Bogotá D.C. (Secretaria Distrital de Gobierno, 2015).

### 2.7.2.1 Estación de monitoreo Simón Bolívar

La Tabla 2 describe las características de la estación de monitoreo de la RMCAB en la localidad de Barrios Unidos.

**Tabla 2.**  
*Estación de monitoreo de la (RMCAB) Parque Simón Bolívar.*

<b>Ubicación:</b>	<b>Calle 63 N° 47 – 06</b>	
<b>Propiedad:</b>	SDA	
<b>Propósito:</b>	Monitoreo Calidad del aire.	
<b>Latitud:</b>	4° 39' 30,05"	
<b>Longitud:</b>	74° 05' 02,03"	
<b>Altura punto de muestreo :</b>	4,6 m	
<b>Parámetros de medición</b>	PM <sub>10</sub> ,PST,O <sub>3</sub> ,CO, SO <sub>2</sub> NO <sub>2</sub>	

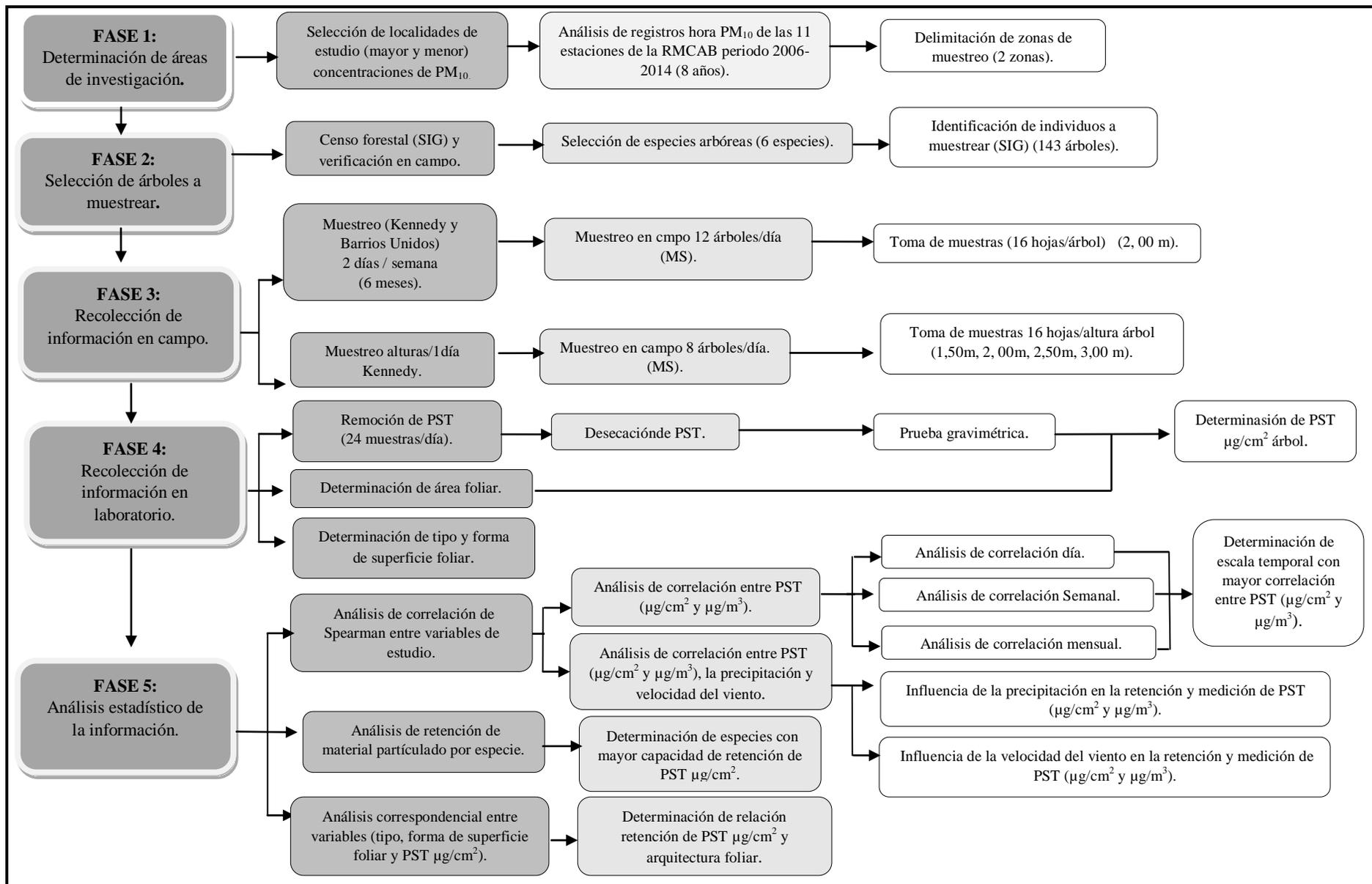
Observaciones: La estación se encuentra ubicada sobre una zona de verde, en el interior de las instalaciones de Coldeportes.

## 2.8 Normatividad y legislación asociada

En el anexo A se presenta de manera detallada la normatividad y legislación Nacional y Distrital aplicable a este proyecto de investigación.

### **3 METODOLOGÍA**

La presente investigación emplea una metodología con un enfoque analítico de tipo cuantitativo, ya que se utilizan métodos matemáticos informáticos y estadísticos para la obtención y análisis de la información. En este sentido, se encuentra conformada por 5 fases diseñadas para alcanzar los objetivos planteados. La descripción general de cada una de las fases de la metodología se presenta a continuación (ver Figura 5)



**Figura 5.** Diagrama de la metodología de investigación

Fuente: Autor.

### **3.1 FASE 1: Determinación de áreas de investigación.**

A partir de las concentraciones horarias de  $PM_{10}$  obtenidas de la red de calidad de aire de la Secretaría Distrital de Ambiente (RMCAB) se estableció un periodo de análisis estadístico de la información de 8 años, para cada una de las once estaciones de RMCAB. Este periodo inicio desde el 01 de enero de 2006 a la 01:00 a.m. hasta el 10 de diciembre de 2014 a las 24:00 p.m. De esta manera, se seleccionaron las estaciones de la RMCAB con las concentraciones promedio horarias de  $PM_{10}$  mayores y menores para el periodo de estudio en la ciudad de Bogotá, teniendo como criterios de selección el promedio móvil mayor y menor de  $PM_{10}$  y porcentaje de datos validos mayor al 85%. Lo anterior, permitió seleccionar a la estación Carvajal-Kennedy con una concentración media horaria de  $PM_{10}$  de  $81 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como el área de muestreo de alta contaminación y la estación Simón Bolívar en la localidad de Barrios Unidos con una concentración promedio horaria de  $PM_{10}$  de  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el área de estudio de las concentraciones de fondo.

#### **3.1.1 Delimitación del área de muestreo en Keneddy**

En la localidad de Kennedy se delimitó un área de muestreo a una distancia de 36 m de la estación de monitoreo de la RMCAB de Carvajal-Sony, sobre la autopista sur, entre las Calle 45 sur y la calle 62ª sur, en la unidad de planeación zonal (UPZ) Carvajal barrio Las Delicias, y como se evidencia en el Anexo B (localización área de muestreo en Kennedy, mapa 1). El área de muestreo contó con una longitud de 500 m (250 m al oriente de la estación y 250 m al oxidente de la estación) a lo largo de la vía y un ancho de 67,80 m, el cual incluyó las distintas partes de la vía (i.e., andenes, ciclo vía, separadores blandos, zona verde, calzada Transmilenio, calzada vehículos particulares y públicos); con lo cual se obtuvo un área total de estudio de

33.900 m<sup>2</sup>. Para observar con mayor detalle las dimensiones de la vía ver en el Anexos B las Figuras 1 y 2.

Según el Plan de Ordenamiento de Bogotá del año 2004 las zonas contiguas al área de muestreo se encuentran clasificadas como de uso comercial e industrial, lo cual permite el funcionamiento de diversas industrias como la cervecera BAVARÍA, Croydon, AZUL K S.A., y el frigorífico Guadalupe S.A.S. Siendo lo anterior, junto con el alto flujo vehicular, las principales causas de la clasificación de esta área como de Clase I (i.e., alta contaminación) (SDA, 2015) (SDA, 2015).

### 3.1.2 Características de la vía de estudio

En la Tabla 3 se presentan las características de movilidad de la vía de estudio, teniendo como datos principales el número de vehículos diarios, la densidad máxima de tráfico hora, la velocidad media, las características del parque automotor y el tipo de pavimento.

**Tabla 3.**  
*Características de la vía en estudio.*

<b>Características</b>	<b>Zona de estudio</b>
<b>Longitud (m)</b>	500
<b>Tipo de pavimento</b>	Concreto
<b>Densidad media de tráfico ( vehículos/d)</b>	60.800
<b>Densidad máxima de tráfico (vehículos/h)</b>	2.500
<b>Velocidad promedio (km/h)</b>	35 (km/h) para automóviles y 14 (km/h) para vehículos de transporte público.
<b>Número de carriles</b>	Tres en cada sentido de la vía y dos para Transmilenio en cada sentido.
<b>Composición del tráfico</b>	El 39% es transporte público, 10,6% de carga, 39,1% automóviles, 2,6% buses intermunicipales y 8,6% taxis.

*Nota.* Fuente: (Secretaria de Movilidad, 2012). Informe de la movilidad en Bogotá D.C.

### **3.1.3 Área de muestreo Simón Bolívar**

En la localidad de Barrios Unidos se estableció el área de muestreo para evaluar las concentraciones de fondo de PST, a una distancia promedio de 360 m de la estación Simón Bolívar de la (RMCAB). El área de investigación se localizó al interior del parque El Lago en la unidad de planeación zonal (UPZ) Parque Salitre (barrio Salitre), como se evidencia en el anexo A (localización área de muestreo en Barrios Unidos, mapa 2). El área de estudio contó con una longitud de 344 m y 34 m de ancho para un área total de 11.696 m<sup>2</sup>. Según el plan de ordenamiento territorial de Bogotá del año 2004 el uso del suelo se encuentra clasificado como de equipamiento, por consiguiente en zonas aledañas se localizan las instalaciones del Centro de Alto Rendimiento de Coldeportes, la Biblioteca Virgilio Barco, el parque metropolitano Simón Bolívar y diversas zonas residenciales.

### **3.2 FASE 2: Selección de árboles a muestrear**

De acuerdo al inventario del arbolado de las áreas de estudio facilitado por la oficina de arboricultura del Jardín Botánico de Bogotá en formato digital y mediante el uso del software ArgGis 10.0, se procedió a elaborar la cartografía digital para la verificación en campo de la presencia de las especies y árboles a muestrear, descartando los individuos muertos o con alto grado de defoliación. Una vez realizada la verificación en campo, se procedió a seleccionar las especies con una población superior al 10 % en las áreas de estudio, según lo propuesto por (Badii et al. (2011).

Una vez seleccionado el 10 % de las especies, se adelantó una segunda verificación en campo para descartar los individuos de las especies seleccionadas que presentaron una altura inferior y

una altura de inicio de copa superior a la altura de muestreo (2,00m). De esta manera, se obtuvo un tamaño de muestra de seis especies y 143 árboles para las dos áreas de muestreo (Ver Tabla 4).

**Tabla 4.**  
*Número de especies y árboles a muestrear durante la investigación.*

<b>Nombre científico</b>	<b>Área de muestreo</b>	<b>No. Árboles</b>
<i>Callistemo citrinus</i>	Kennedy	29
<i>Tecoma stans</i>	Kennedy	22
<i>Eucalyptus ficifolia</i>	Kennedy	12
<i>Ligustrum lucidum</i>	Kennedy	45
<i>Quercus humboldtii</i>	Barrios Unidos	19
<i>Lafoensia acuminata</i>	Barrios Unidos	16
Árboles muestreados	Kennedy	108
Árboles muestreados	Barrios Unidos	35
Total de árboles muestreados		143

*Nota.* Fuente: Autor.

La selección de los arboles a muestrear se realizó a partir de un modelo de muestreo sistemático (MS), siendo este el más apropiado para muestreos en donde la población se encuentra espacialmente dispuesta de forma organizada; como lo proponen Ospina (2001) y Scheffer (2007). Este modelo permitió obtener un número de muestras diarias con representatividad y cobertura espacial de las concentraciones de PST presentes en cada área de estudio, siendo además acorde con los recursos dispuestos en esta investigación. Para la aplicación de este modelo se utilizó la Ecuación 1.

$$k = \frac{N}{n} \quad (1)$$

Donde (k) es el salto sistemático, (N) la población total de una especie y (n) el número de individuos a muestrear por especie, utilizando para cada población un (n = 2). De esta manera fueron seleccionados 12 árboles por día de muestreo, ocho en el área de estudio en Kennedy (Autopista Sur) y cuatro en Barrios Unidos (Parque El Lago), para un número de 24 árboles semanales, 96 mensuales y 576 durante los seis meses de análisis de la retención de PST por el arbolado urbano.

Así mismo, se procedió a estimar el límite de error para el muestreo con el uso de la Ecuación 2.

$$\sqrt{V(\bar{Y}_{sy})} = \sqrt{\frac{S^2}{n} \left(\frac{N-n}{N}\right)} \quad (2)$$

Donde  $V(\bar{Y}_{sy})$  es la varianza estimada de  $(\bar{Y}_{sy})$ ,  $(S^2)$  la desviación estándar, (N) la población y (n) número de hojas colectadas.

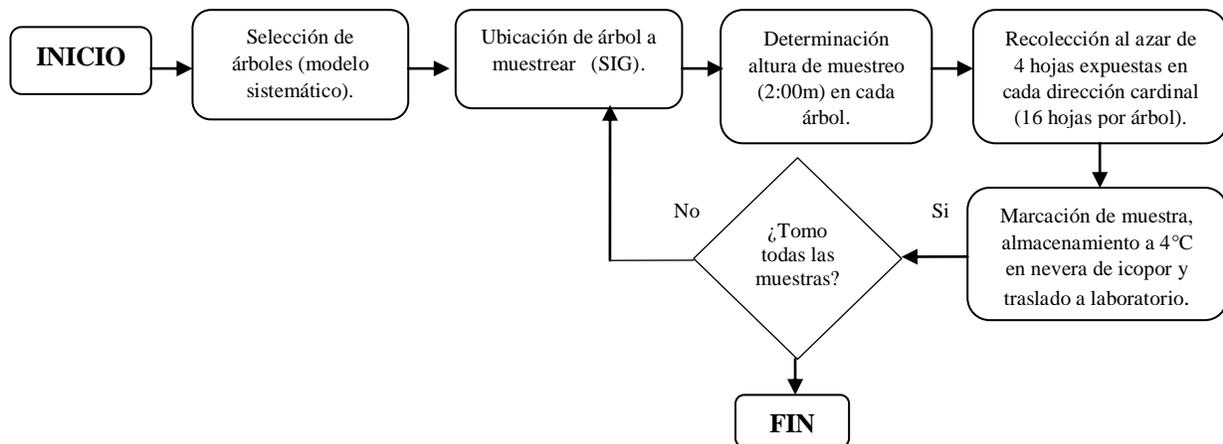
### **3.2 FASE 3: Recolección de información en campo.**

La recolección de muestras se realizó durante los días domingo y miércoles, de 9:00 a.m. a 10:00 a.m. en el área de muestreo de Kennedy y durante la hora siguiente de 10:00 a.m. a 11:00 a.m. en el área delimitada para Barrios Unidos (concentración de fondo). Debido a que por cuestiones logísticas no se lograron muestrear las dos áreas de estudio durante la misma hora, se procedió a realizar el muestreo en Barrios Unidos durante la hora siguiente.

#### **3.2.1 Toma de muestras foliares.**

Por cada árbol muestreado se colectaron 16 hojas sanas de diferentes tamaños en las ramas más expuestas, cuatro en cada dirección cardinal a una altura de 2,0 m; como altura intermedia a la que se hallan las mayores concentraciones de PST en el arbolado urbano (Beckett P. F., 2000).

Cada muestra fue depositada en bolsa ziplock previamente marcada (fecha, lugar, especie y número del individuo), posteriormente se almacenaron en una nevera a 4 °C para ser tratadas en laboratorio (ver Figura 6 y Anexo C). De esta manera se tomaron 578 muestras, conformadas por 9.216 hojas durante los seis meses de análisis de la retención de PST por el arbolado de las áreas de investigación.



**Figura 6.** Diagrama procedimiento de muestreo en campo.  
Fuente: Autor.

### 3.2.2 Muestreo de retención de material particulado a diferentes alturas

Para evaluar de manera preliminar la retención de PST a diferentes alturas en la zona de muestreo en Kennedy. Mediante un único muestreo se procedió a seleccionar el árbol tipo para cada especie presente en el área de estudio en Kennedy, obteniendo un tamaño de muestra de cuatro individuos. A cada árbol le fueron extraídas 16 hojas sanas de diferentes tamaños en las ramas más expuestas en dirección a la vía, por altura de muestreo (1,50 m, 2,00 m, 2,50 m y 3,00 m). Las muestras fueron puestas en bolsa ziplock marcadas (fecha, lugar de muestreo, especie, número de individuo y altura de muestreo), posteriormente se almacenaron en una nevera a 4 °C para ser tratadas en laboratorio.

### **3.3 Fase 4: Recolección de información en laboratorio**

A continuación se describe de manera sucinta el procedimiento utilizado en laboratorio. De igual manera, en el Anexo C se presenta de manera más detallada. Este procedimiento fue adaptado y calibrado mediante ensayos de laboratorio a partir de lo propuesto por Alcalá. (2010); Duran. (2009); Jardín Botánico de Bogotá (2009); y Rincón. (2012).

#### **3.3.1 Manejo de muestras y procedimientos en laboratorio**

Las muestras almacenadas en nevera a 4 °C para su conservación fueron trasladadas semanalmente al laboratorio de suelos de la Facultad de Medio Ambiente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, para ser sometidas a los diferentes tratamientos definidos para el retiro y la obtención del material atmosférico particulado.

##### **3.3.1.1 Estabilización del peso del material volumétrico**

Para hallar la cantidad de material particulado retenido por las superficies foliares se utilizaron 24 frascos de vidrio refractario con capacidad de 110 ml. A este material volumétrico se le realizó un pre tratamiento de lavado con agua desionizada. Finalizado el lavado el material volumétrico fue sometido a un proceso de secado en estufa a 50 °C durante 20 minutos; tiempo tras el cual los frascos fueron retirados de la estufa, tapados, pesados y marcados. (Ver el procedimiento en detalle en el Anexo C).

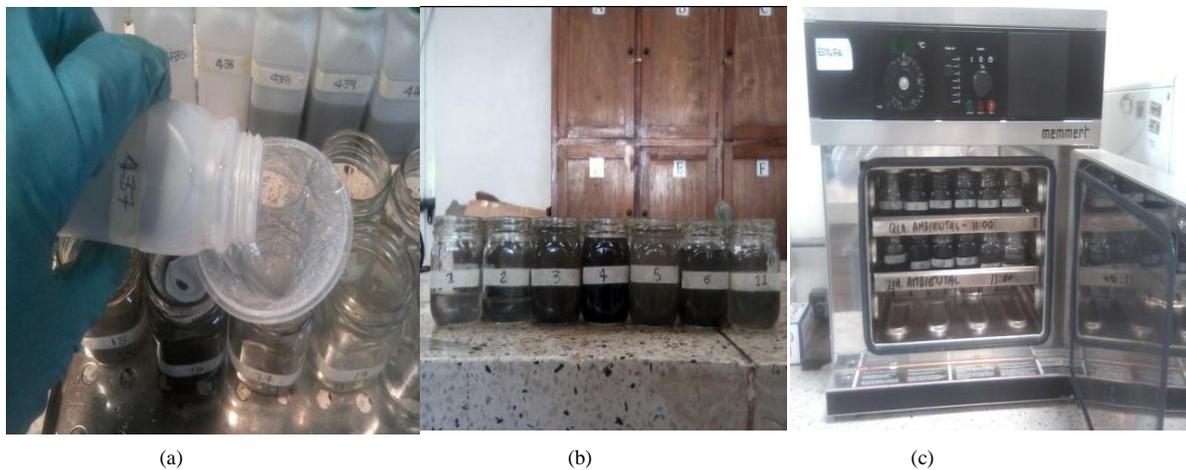
##### **3.3.2 Remoción del material particulado de los folios**

Cada muestra fue lavada con agua desionizada mediante el uso de una bomba manual de 750 cm<sup>3</sup>, pincel de cerdas finas, suaves y delgadas para desprender el material particulado de las hojas y las bolsas ziplock. Durante el lavado el material particulado fue depositado utilizando embudo de vidrio con diámetro de 12,00 cm en vaso de precipitado de 250 ml para ser puesto en

su correspondiente recipiente volumétrico de 110 ml, previamente marcado y pesado (ver el procedimiento en detalle en el Anexo C).

Una vez tratadas las 24 muestras colectadas durante la semana, el material particulado en dilución fue puesto en estufa de aire forzado a una temperatura de 80 °C durante 72 horas; tiempo a partir del cual se obtuvo la fracción sólida del material particulado en re-suspensión PST retenido por las superficies foliares (ver Figuras 7 y 8).

Las muestras que no fueron secadas por algún inconveniente en laboratorio, se depositaron en envase plástico blanco de 150 cm<sup>3</sup> (nuevo); el cual fue debidamente sellado y marcado (número de la muestra, fecha de recolección y de tratamiento en laboratorio) para su posterior almacenamiento en el laboratorio en condiciones de aislamiento y a temperatura ambiente.

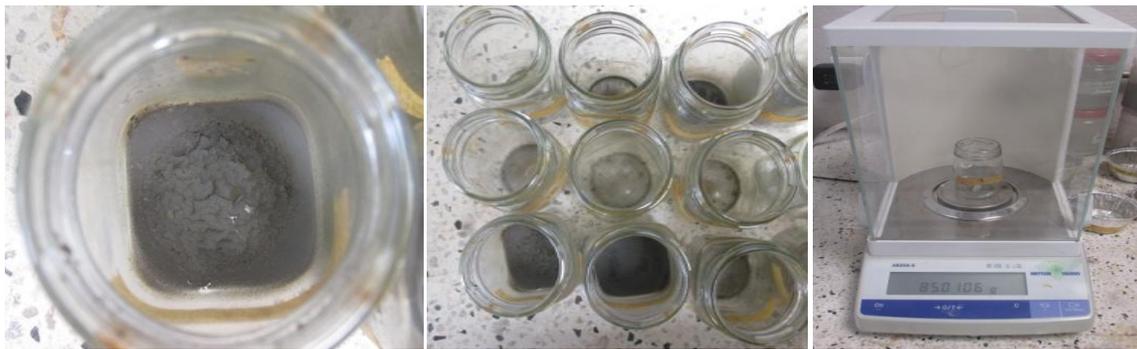


**Figura 7.** Material particulado retirado de las muestras, listo para ser desecado. (a) Colocación del material particulado en disolución en su respectivo recipiente volumétrico; (b) muestras de material particulado en disolución listas para ser tratadas; (c) material particulado en disolución puesto ha secado en estufa de aire forzado.

Fuente: Autor.

### 3.3.2. Estimación de concentraciones de PST retenido por las superficies foliares

Una vez transcurridas las 72 horas fueron retirados de la estufa los frascos con el material particulado (PST), tapados y puestos en reposo hasta alcanzar la temperatura ambiente. Mediante prueba gravimétrica en balanza analítica de cuatro cifras (ver Figura 8 y Anexo C), se procedió a estimar el peso en (mg).



(a) (b) (c)  
**Figura 8.** Material particulado retenido por las muestras. (a) PST en fracción sólida obtenido en laboratorio una vez transcurridas las 72 horas de secado a 80 °C; (b) PST retenido por árbol y especie muestreada; (c) prueba gravimétrica para la estimación de la cantidad de PST retenido por la muestra en gramos (g).

Fuente: Autor

Para estimar la cantidad de material particulado PST retenido por muestra se utilizó la Ecuación 3.

$$MP = (Pf - Pi) * 1000 \quad (3)$$

Donde MP es el material particulado retenido por cada árbol día expresado en ( $\mu\text{g}$ ), Pf es el peso final del frasco en (mg) y Pi es el peso inicial del frasco en (mg), después del proceso de secado.

Para establecer las concentraciones de PST retenida por árbol muestreado en ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), se procedió a utilizar la Ecuación 4.

$$PST = \frac{MP}{AF} \quad (4)$$

Donde PST son las partículas sólidas totales expresadas en ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), MP es el material particulado retenido por el árbol muestreado en ( $\mu\text{g}$ ) y AF es la sumatoria del área foliar de las 16 hojas tomadas del árbol muestreado en ( $\text{cm}^2$ ).

### 3.3.3 Estimación del área foliar

Una vez removido el material particulado, las 16 hojas árbol que conformaron cada muestra fueron escaneadas en impresora HP Deskjet 3510 usando como referencia numérica una escala de 3,00 cm en papel milimetrado y un rotulo con el número de la muestra y fecha de recolección en campo (ver Figura 9 y Anexo C). Se determinó el área en  $\text{cm}^2$  de cada folio mediante escala binaria (blanco/negro), calculando la proporción de niveles que pertenecen a las hojas dentro del área total de la imagen y con la utilización del software libre *ImageJ versión 1.45*; según lo propuesto por Rincón (2012). El área foliar ( $\text{AFcm}^2$ ) de cada muestra es el resultado de la sumatoria del área de cada una de las 16 hojas tomadas en campo, este cálculo se realizó mediante la utilización del software Microsoft Excel.



**Figura 9.** Resultado escáner de las hojas de la muestra 366 (*Eucalyptus Ficifolia*) tomada el 21-06-2015 en la localidad de Kennedy. (a) Imagen escaneada en impresora HP Deskjet 3510; (b) imagen procesada en software *ImageJ* lista para hallar el área foliar en  $\text{cm}^2$  mediante el cálculo de la escala binaria (blanco/negro), correspondiente a cada hoja dentro de la imagen.

Fuente: Autor.

### **3.3.4 Identificación de las características de la superficie foliar**

Para identificar las características de la superficie foliar de las especies muestreadas se procedió a establecer un tamaño de muestra de cuatro árboles por especie, obteniendo una población total de estudio de 24 individuos. A cada árbol le fue colectada una muestra conformada por 16 hojas sanas de diferentes tamaños, a una altura de 2,00 m; lo cual permitió obtener 64 hojas por especie, según lo propuesto por Dobbs (2005) para la determinación de este tipo de características foliares. Posteriormente en laboratorio las muestras fueron lavadas y secadas a temperatura ambiente, siendo clasificadas por árbol muestreado y escaneadas en una impresora HP Deskjet 3510 y usando como referencia numérica una escala de 3,00 cm.

Con la utilización del software libre ImageJ versión (1.45) se procedió a establecer las características de arquitectura foliar (i.e., largo máximo foliar (LM), ancho máximo foliar (AM), área foliar promedio (AF). La forma de hoja y tipo de superficie se hallaron mediante el uso de un estereoscopio. Para esto, se seleccionó una sub-muestra de 10 hojas equivalentes al 15,6 % del total de hojas colectadas por especie (64 hojas en total).

### **3.4 FASE 5: Análisis estadístico de la información**

Para el análisis de la información cuantitativa y cualitativa se utilizaron los software InfoStat versión 2015 y SPSS (Versión 17.0). Debido a que las muestras colectadas en campo fueron por árbol, los datos cuantitativos obtenidos no presentan un comportamiento normal, en este sentido se realizaron pruebas estadísticas no paramétricas de Spearman, Friedman y Kruskal-Wallis (ver Tabla 5).

### **3.4.1 Análisis de correlación de Spearman entre concentraciones de PST.**

Con el fin de evaluar la relación entre las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenidas por las superficies foliares de las especies vegetales y las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportadas por la estación de calidad del aire, se realizaron análisis de correlación de Spearman teniendo en cuenta tres escalas temporales: diaria, semanal y mensual. Para la escala temporal diaria la concentración por especie correspondió al promedio de PST de dos individuos (recolectadas el mismo día) y, para la estación de calidad del aire se utilizó el PST promedio diario durante el mismo día de muestreo (PST de 24 horas-diario; 49 observaciones).

Así mismo, las concentraciones de la escala temporal semanal por especie correspondieron al promedio de PST de dos días de muestreo sobre las especies vegetales (domingo y miércoles) y, para la estación se utilizó el promedio móvil de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportado durante la semana de muestreo por la estación (25 observaciones). Finalmente, las concentraciones utilizadas en la escala temporal mensual correspondieron al promedio de retención de PST mensual por especie y, para la estación de calidad del aire se utilizó el promedio móvil mensual reportado por la estación (6 observaciones). Todo lo anterior, teniendo como base los datos diarios de calidad del aire reportados por las estaciones de monitoreo.

### **3.4.2 Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo.**

Con el fin de evaluar la influencia del factor distancia entre las magnitudes de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenido por las especies y las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportadas por las estaciones de monitoreo, se procedió a realizar un análisis espacial. Para esto el dato de concentración por especie día es la concentración de PST retenida por árbol en su lugar de ubicación dentro del área de estudio (p.ej. Zona verde, Andén costado sur) y no el promedio de los dos individuos

muestreados por día. Así mismo los valores de concentraciones de PST reportados por las estaciones de RMCAB Carvajal Kennedy y Simón Bolívar fueron los utilizados en el análisis de correlación general en las escalas temporales día, semanal y mensual.

### **3.4.2 Análisis de correlación de Spearman entre PST, la precipitación y velocidad del viento**

Para determinar la influencia de variables climáticas como la precipitación, la velocidad del viento en la retención de PST por las especies y las concentraciones de PST reportados por las estaciones de la RMCAB se procedió a realizar una prueba de correlación de Spearman. Para esto las concentraciones de PST de las especies y las estaciones fueron el promedio móvil mensual y los valores de velocidad del viento y precipitación fueron el promedio móvil mensual, reportado durante los 6 meses de muestreo.

### **3.4.3 Análisis de retención de material particulado por especie**

Para determinar posibles diferencias en la retención de material particulado entre especies se procedió a realizar un análisis de varianza de Kruskal-Wallis. Para esto las magnitudes de concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) por especie, fue el promedio de la retención de los dos árboles muestreados por día (49 observaciones). De igual manera se procedió a realizar la prueba de varianza de Kruskal-Wallis para medir el efecto de la precipitación en la retención de PST por las especies.

### **3.4.5 Análisis de relación entre la retención de PST y el tipo y forma de superficie foliar.**

Para determinar la relación entre, el tipo de forma, superficie foliar y la retención de PST de las especies se realizó un análisis correspondencial múltiple, dándole un peso igual de importancia a cada variable.

**Tabla 5.***Variables en estudio y pruebas estadísticas utilizadas para el análisis de la información.*

<b>Variables dependientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentraciones de PST (<math>\mu\text{g}/\text{cm}^3</math>) promedio móvil diario, semanal y mensual reportadas por las estaciones de monitoreo Carvajal y Simón Bolívar durante los seis meses de estudio.</li> </ul>
<b>Variables independientes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentraciones de PST (<math>\mu\text{g}/\text{cm}^2</math>) promedio móvil diario, semanal y mensual retenidas por las seis especies vegetales muestreadas durante el periodo de estudio.</li> <li>• Velocidad del viento promedio móvil mensual.</li> <li>• Dirección del viento durante el día de muestreo en Kennedy.</li> <li>• Precipitación acumulada mes y precipitación promedio móvil mensual reportada por las estaciones.</li> <li>• Largo máximo foliar (LMF), ancho máximo foliar (AMF) y área foliar (AF).</li> </ul>
<b>Tipo de estadística</b>	Pruebas paramétricas y no paramétricas
<b>Prueba</b>	<p data-bbox="560 1150 1112 1182">Análisis de correlación simple de Spearman</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Coeficiente de determinación <math>R^2</math></li> <li>• Anova de Friedman</li> <li>• Análisis de la varianza Kruskal-Wallis</li> <li>• Análisis correspondencial múltiple</li> </ul>

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Análisis de correlación entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo

En este acápite se procedió a establecer el grado de correlación estadística entre las concentraciones del contaminante PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenido por la superficie foliar de las especies vegetales y las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportadas por las estaciones de monitoreo durante los días de muestreo. Lo anterior, con el objeto de evaluar si las concentraciones de PST retenido por las superficies foliares de las especies vegetales puede ser un parámetro de referencia del nivel de contaminación atmosférica por PST en áreas urbanas (i.e., de retención de partículas).

#### 4.1.1 Análisis de correlación entre las concentraciones de PST y $\text{PM}_{10}$ en las estaciones de monitoreo

El parámetro de calidad del aire utilizado inicialmente como referente de la contaminación atmosférica por material particulado fue  $\text{PM}_{10}$  (i.e., partículas con diámetro menor o igual a 10  $\mu\text{m}$ ), siendo este el parámetro que más sobrepasó las concentraciones permitidas por la legislación vigente en la ciudad de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, 2014). Debido a que el material particulado obtenido en laboratorio sobre las especies vegetales fue PST (i.e., partículas con diámetro menor o igual 100  $\mu\text{m}$ ), los análisis entre las variables en estudio se realizaron con respecto a los valores de PST reportados por las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) presentes en el área de investigación.

En relación a lo anterior, es indispensable resaltar como según lo propuesto por Toro et al. (2006) existe una fuerte correlación lineal entre las concentraciones de los parámetros de calidad

del aire PST y PM<sub>10</sub>. De acuerdo con esto, se procedió a establecer la relación entre las concentraciones de estos dos parámetros en las estaciones de estudio. De esta manera, en la Tabla 6 se presentan los valores de correlación no paramétrica de Spearman entre estos contaminantes atmosféricos.

**Tabla 6.**

*Coefficientes de correlación entre concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> en las estaciones de la RMCAB.*

Estación	Spearman		
	r	$\rho$ .	R <sup>2</sup>
Carvajal Sony	0,93	0,00*	0,86
Simón Bolívar	1,00	0,00*	1,00

*Nota.*  $\rho$ . = Valores de significancia.

\*la correlación es significativa al nivel 0,01

Fuente: Autor.

Los coeficientes de correlación lineal de Spearman (r) entre las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> evidenciaron correlaciones positivas fuertes entre estas dos variables, con unos valores de significancia estadística inferiores a 0,01; indicando una fuerte correlación no paramétrica entre las variables en estudio. Así mismo, los coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) indicaron como la variable X (PST) tiene una alta capacidad predictiva de las concentraciones de la variable Y (PM<sub>10</sub>), explicando en un 86 % y 100 % las concentraciones de la variable Y reportadas por las estaciones de muestreo en Carvajal y Simón Bolívar, respectivamente. Estos resultados fueron similares a los reportados por (Toro & Marin, 2006) quienes obtuvieron unos coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) de 0,83 y 0,89 entre las concentraciones de PST y PM<sub>10</sub> en las estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Valle de aburra.

#### **4.1.2 Correlación entre concentraciones de PST en especies vegetales y la estación de monitoreo Carvajal (Kennedy)**

Los resultados de la correlación de Spearman mostraron como las mejores correlaciones se presentaron para la escala de tiempo mensual y las más débiles para las escalas temporales diaria

y semanal, respectivamente (ver Tabla 7). Desde el punto de vista mensual, la especie *Ligustrum lucidum* presentó la única correlación significativa inversa considerable ( $r = -0,82$ ) respecto a las concentraciones de PST de la estación Carvajal. Lo que demuestra cómo la variación de las concentraciones de PST promedio mensual retenidas por la superficie foliar de la especie *Ligustrum lucidum* se relacionan de forma inversa con las concentraciones de PST mensual de la estación Carvajal (ver Figura 10). Finalmente, la estación Carvajal se localizó en promedio a una distancia de 121,8 m con respecto de las especies muestreadas.

**Tabla 7.**

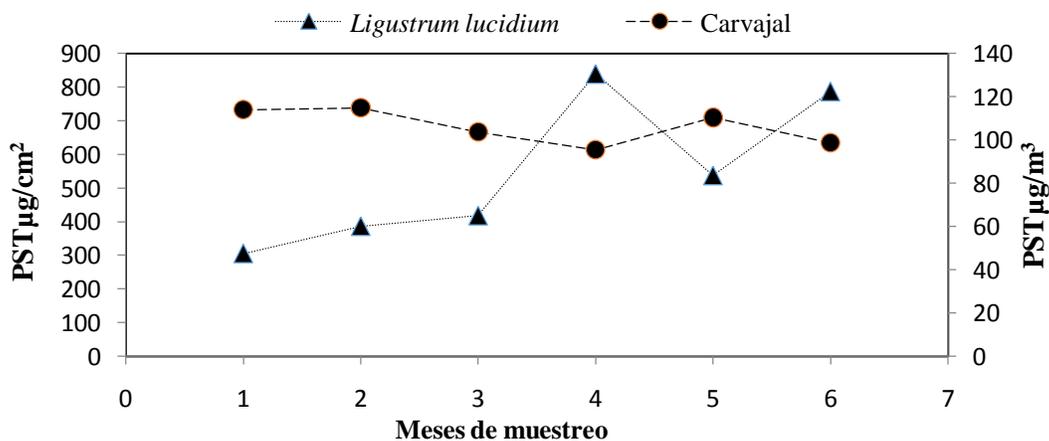
*Correlación de Spearman entre PST de especies vegetales y PST de la estación Carvajal.*

Especies	Coeficientes de correlación de Spearman (r)					
	Diaria (r)	$\rho$ .	Semanal (r)	$\rho$ .	Mensual (r)	$\rho$ .
<i>Callistemo citrinus</i>	-0,00	0,98	-0,06	0,74	0,31	0,54
<i>Tecoma stans</i>	-0,03	0,82	-0,21	0,31	-0,77	0,07
<i>Eucalyptus ficifolia</i>	0,25	0,77	-0,12	0,55	-0,14	0,78
<i>Ligustrum lucidum</i>	-0,12	0,39	-0,28	0,17	-0,82	0,04*

Nota.  $\rho$  = Valores de significancia

\*la correlación es significativa al nivel 0,05

Fuente: Autor.



**Figura 10.** Variación de las concentraciones de PST mensual de la especie *Ligustrum lucidum* con respecto al PST mensual de la estación Carvajal.

Fuente: Autor.

### 4.1.3 Correlación entre concentraciones de PST en especies vegetales y la estación Simón Bolívar

Los resultados de correlación de Spearman en el Parque El Lago, de la misma manera que los resultados evidenciados en Kennedy, mostraron correlaciones débiles en las escalas temporales diaria y semanal, presentando mejores correlaciones bajo la escala temporal mensual (ver Tabla 8). Sin embargo, las correlaciones no fueron estadísticamente significativas ( $p > 0,05$ ). Lo anterior posiblemente debido a la distancia entre el área de muestreo de las especies vegetales y la estación de monitoreo Simón Bolívar (i.e., 365 m).

**Tabla 8.**  
Correlación de Pearson de PST de especies vegetales del área de las concentraciones de fondo.

Especies	Coeficientes de asociación de Pearson (r)						
	Nombre	Día(r)	$\rho$	Semana (r)	$\rho$	Mes (r)	$\rho$
<i>Quercus humboldtii</i>		-0,21	0,151	-0,28	0,178	-0,58	0,225
<i>Lafoensia acuminata</i>		0,21	0,141	-0,27	0,194	-0,50	0,315

Nota.  $\rho$  = Valores de significancia  
Fuente: Autor.

Lo anterior, sugirió un radio de influencia menor para poder visualizar la relación de PST entre estaciones de monitoreo y especies vegetales. Es decir, para poder evaluar la relación entre el PST retenido por las especies vegetales y el reportado por las estaciones de monitoreo, probablemente debería existir una distancia inferior a 365 m. A la luz de otros estudios los resultados, concordaron con lo indicado por Zafra et al. ( 2017) quienes reportaron que la mejor distancia para demostrar estos hallazgos es entre 50 y 100 m, con respecto a la ubicación física de las estaciones de monitoreo.

Por otro lado, los resultados obtenidos entre la especie *Ligustrum lucidum* y la estación Carvajal presentaron tendencia opuesta a lo reportado en Simón Bolívar, corroborando como a menor radio de influencia entre la estación de monitoreo y las especies vegetales (menor de 128 m) se

visualizaron magnitudes de correlación significativas entre las concentraciones de PST en estudio. Finalmente, estos resultados mostraron concordancia respecto a la distancia en lo reportado en otras investigaciones (Steffens, 2012).

#### **4.1.4 Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo**

A partir de los anteriores resultados de correlación de Spearman ( $r$ ), se procedió a estudiar la influencia de la distancia promedio entre la ubicación de las especies vegetales y las estaciones de monitoreo (ver Anexo D, mapa 1 y mapa 2). Adicionalmente, en el área de muestreo en Kennedy fue considerada la distancia de las especies muestreadas con respecto de la vía, con el fin de identificar posibles diferencias en las concentraciones de PST como resultado de una mayor o menor cercanía a las fuentes móviles emisoras de material particulado (i.e., los vehículos).

##### **4.1.4.1 Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y la estación Carvajal (Kennedy)**

Para evaluar la influencia de la cercanía a la superficie vial y la distancia de las especies vegetales a la estación Carvajal, se procedió a tomar como dato de concentración de PST por especie el valor muestreado según su localización: (i) Zona verde, (ii) Anden costado norte, (iii) Separador vial, (iv) Anden costado sur (ver Figura 11), y no el promedio de los dos individuos muestreados diariamente. Los resultados del análisis espacial de correlación de Spearman (i.e., relación entre especies vegetales y estación de monitoreo) mostraron las mejores correlaciones en dos de las cuatro especies muestreadas en la escala de tiempo mensual: *Tecoma stans* y

*Ligustrum lucidum* (ver Tabla 9). (Zafra Megía, Palacio Soto, & Rodríguez Miranda, 2014)  
(Zafra Megía, Palacio Soto, & Rodríguez Miranda, 2014)

Desde el punto de vista mensual las concentraciones de PST de la especie *Tecoma stans* evidenciaron la mayor correlación inversa considerable ( $r = -0,88$ ) en los árboles localizados en la zona verde (ver Figura 11 y Figura 12), a la mayor distancia promedio respecto a la vía en estudio (16 m) y a la menor distancia promedio de la estación Carvajal (86 m). De igual manera, la especie *Ligustrum lucidum* evidenció una correlación inversa considerable ( $r = -0,82$ ) en el costado sur de la vía, a la mayor distancia promedio de la estación (147 m), y a la menor distancia de la vía (1,0 m) (ver Figura 11).



**Figura 11.** Vista en planta de la zona de estudio en Kennedy (Vía, Autopista Sur entre las Calle 45 sur y la calle 62ª sur, Barrio Las Delicias Bogotá D.C.)  
Fuente: Autor.

**Tabla 9.**

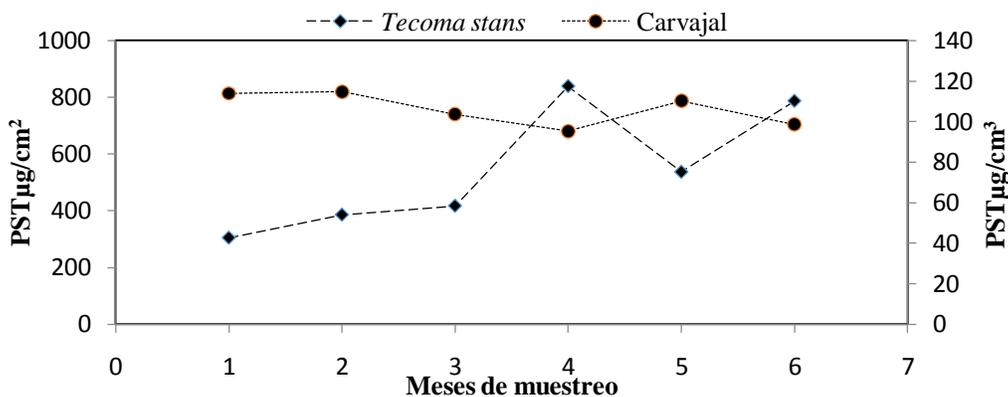
Valores del análisis espacial de correlación de Spearman en Kennedy estación Carvajal

Especies	Coeficientes de correlación de Spearman (r)				
	Mensual (r)	$\rho$ .	Ubicación	Dist. a la vía	Dist. Prom. a la estación
<i>Tecoma stans</i>	-0,88	0,01*	Zona verde	16,00 m	86,00 m
<i>Tecoma stans</i>	-0,65	0,15	Separador vial	1,00 m	172,00 m
<i>Ligustrum lucidium</i>	-0,82	0,04*	Costado sur de la vía	1,00 m	147,00 m
<i>Ligustrum lucidium</i>	-0,65	0,15	Costado norte de la vía	1,00 m	109,00m

Nota.  $\rho$ . = Valores de significancia. Dist. = Distancia. Prom. = Promedio

\*la correlación es significativa al nivel 0,05

Fuente: Autor.



**Figura 12.** Variación mensual de las concentraciones de PST de la especie *Tecoma stans* con respecto al PST de la estación Carvajal

Fuente: Autor

Por otro lado, las magnitudes de correlación de Spearman en la escala temporal mensual entre individuos de la misma especie evidenciaron como a mayor distancia de la vía la especie *Tecoma stans* presentó mejor correlación (zona verde,  $r = -0,88$  y separador vial,  $r = -0,51$ ); lo cual además estuvo asociado con menores concentraciones de PST mensual detectadas a mayor distancia (zona verde:  $545 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  y separador vial:  $657 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) respecto a las fuentes de emisión; es decir, con respecto al tráfico vehicular (ver Figura 11).

De igual manera, la especie *Ligustrum lucidium* evidenció diferencias en las magnitudes de correlación en los dos sitios de muestreo en la Autopista sur (Anden costado sur,  $r = -0,82$ ; y Anden costado norte,  $r = -0,61$ ), indicando como a menores concentraciones de PST mensual

(Anden costado sur:  $711 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  y Anden costado norte:  $848 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) se presentaron mejores correlaciones (ver Figura 10).

Los resultados mostraron concordancia respecto a mayores concentraciones de PST en las espeies a menor distancia de la vía, aspecto encontrado en otras investigaciones (Steffens et al., 2012 y Ugolinia et al., 2013). Sin embargo A la luz de otros estudios de referencia para esta investigación, se encontró como además los resultados pueden estar influenciados por diversas características propias del área de estudio y de las especies muestreadas como por ejemplo:

(i) Escasa altura de emisión del material particulado (PST y  $\text{PM}_{10}$ ) generado por las fuentes móviles (escapes de vehículos), lo cual generó una elevada re-suspensión de éste en la zona de estudio, posibilitando una mayor retención por las superficies foliares de los árboles más cercanos a la vía, lo cual fue coherente con lo reportado por Ramos (20012).

(ii) Las condiciones propias de cañón urbano del área de estudio causadas por la cercanía de edificaciones a la vía (ver Figura 11), lo cual reduce la velocidad de mezcla del material particulado (PST y  $\text{PM}_{10}$ ); posibilitando la creación de vórtices que facilitan la persistencia y precipitación del material particulado en el área de emisión, según lo expuesto por Lipp (2014).

(iv) Mayores concentraciones de PST en el centro y en el costado norte de la vía asociadas al alto tránsito de buses de Transmilenio y vehículos particulares, lo cual junto con las direcciones (SW, SSW, S, SSE y SE) y velocidad del viento predominante (baja velocidad) favorecieron una mayor retención de (PST y  $\text{PM}_{10}$ ) por los árboles de las especies *Tecoma stans* y *Ligustrum lucidium* localizados en estas zonas (ver Figura 11).

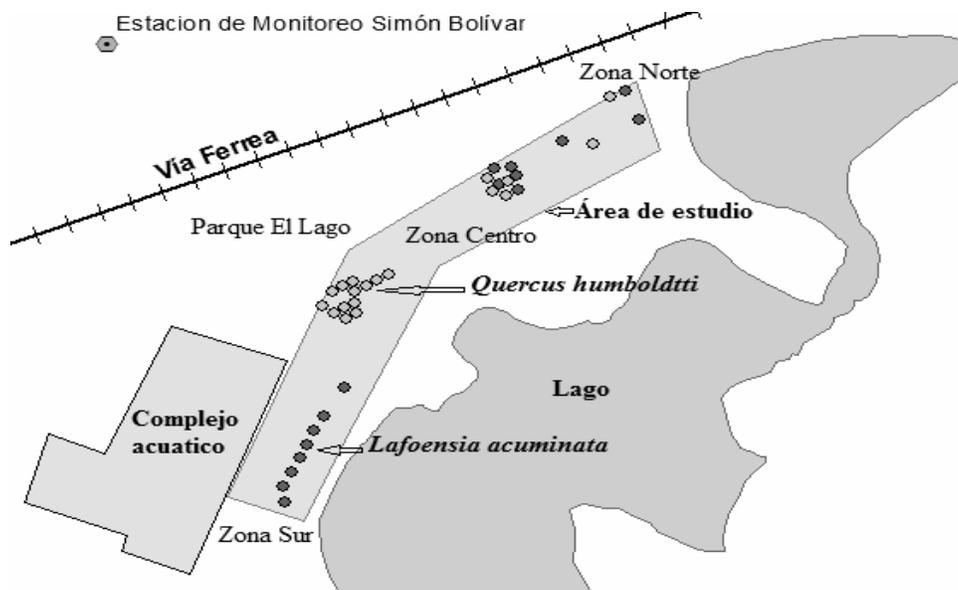
(v) El tamaño y forma del material particulado: diámetro  $> 2,5 \mu\text{m}$  y forma filamentosa, según lo reportado por Moreno et al. (2011), lo cual favoreció la retención y acumulación residual de

material particulado sobre las superficies foliares; permitiendo de esta manera un mayor grado de correlación con el promedio mensual de PST reportado por la estación Carvajal durante el periodo de estudio.

A partir de los anteriores resultados, se logró identificar las siguientes especies arbóreas en orden de importancia, localizadas en la zona verde y en el costado sur de la vía: (i) *Tecoma stans*, y (ii) *Ligustrum lucidum*; que fueron las más representativas para evaluar la calidad del aire para elevadas concentraciones de PST en la Autopista sur. Adicionalmente, las concentraciones de material particulado retenido por estas especies vegetales podrían considerarse como un indicador de la calidad del aire por contaminación de material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) en zonas con condiciones similares. Finalmente, los resultados sugieren que la evaluación de la contaminación por material particulado debe adelantarse bajo una escala de tiempo mensual; posibilitando establecer pronósticos preliminares del comportamiento de las concentraciones de material particulado en corredores viales en el mediano plazo.

#### **4.1.4.2 Análisis espacial entre las concentraciones de PST en especies vegetales y la estación Simón Bolívar**

Para evaluar la influencia del factor distancia entre las especies vegetales muestreadas y la estación Simón Bolívar en las magnitudes de correlación de Spearman obtenidas en el área de las concentraciones de fondo de PST (i.e., Parque El Lago), se procedió a efectuar sobre las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) reportadas por la estación Simón Bolívar el mismo tratamiento estadístico realizado a las concentraciones de la estación Carvajal en Kennedy; en las escalas temporales diaria, semanal y mensual, según la localización de las especies en el área de estudio: (i) Zona norte, (ii) Zona centro y (iii) Zona sur (ver Figura 13).



**Figura 13.** Vista en planta del área de muestreo de las concentraciones de fondo de PST en el parque el lago Barrios Unidos  
Fuente: Autor

Los resultados del análisis espacial de correlación de Spearman de las especies vegetales muestreadas en el Parque El Lago, de la misma manera a lo evidenciado en Kennedy, mostraron las mejores correlaciones en la escala de tiempo mensual (ver Tabla 10).

**Tabla 10**

*Valores del análisis espacial de correlación de Spearman en Barrios Unidos*

Especie Nombre	Coeficientes de asociación de Spearman (r)			
	Mensual (r)	$\rho$ .	Ubicación	Dist. Prom. a la estación(m)
<i>Quercus humboldtii</i>	-0,81	0,05*	Zona centro	340
	-0,66	1,14	Zona norte	344

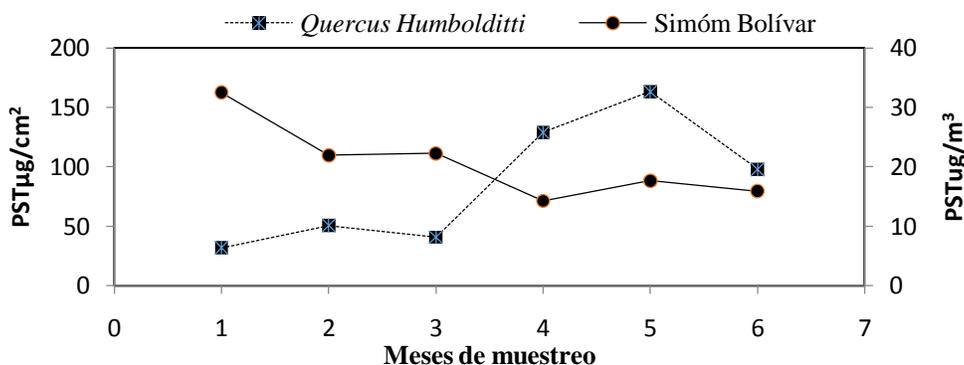
Nota.  $\rho$  = Valores de significancia. Dist. Prom. = Distancia Promedio

\*la correlación es significativa al nivel 0,05

Fuente: Autor.

Desde el punto de vista mensual, la variación de las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) retenidas por las superficies foliares de la especie *Quercus humboldtii* mostraron una correlación inversa considerable ( $r = -0,81$ ) respecto a las concentraciones de PST de la estación Simón Bolívar; en los arboles localizados en la zona centro, a la menor distancia promedio de la estación (340 m)

(ver Figura 13). Lo anterior indicó como a medida que se reducen las concentraciones de PST reportadas por la estación Simón Bolívar se incrementan las concentraciones de PST retenidas por la especie *Quercus humboldtii*, principalmente durante los últimos tres meses de muestreo (ver Figura 14.).



**Figura 14.** Variación de las concentraciones de PST mensual la especie *Quercus humboldtii* en la zona centro de muestreo con respecto al PST mensual de la estación Simón Bolívar.

Fuente: Autor.

Por otro lado, los resultados permitieron evidenciar con respecto de las magnitudes de correlación de Spearman en la escala temporal mensual entre individuos de la misma especie, que a mayor distancia promedio de la estación la especie *Quercus humboldtii* presentó menor correlación (Zona norte,  $r = -0,66$  y Zona centro,  $r = -0,81$ ); lo cual además estuvo relacionado con mayores concentraciones de PST detectadas a mayor distancia de la estación (Zona norte  $109 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  y Zona centro  $86 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Los anteriores resultados presentaron concordancia con el factor distancia entre las especies vegetales muestreadas y las estaciones de monitoreo en las dos zonas de estudio; indicando como al incrementarse la distancia las magnitudes de correlación fueron más débiles. De igual manera los resultados permitieron observar como a mayores concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenidas por las superficies foliares, se presentaron menores correlaciones entre las especies vegetales y las estaciones de monitoreo, como consecuencia de una menor distancia con respecto al tráfico

vehicular (280 m); siendo este comportamiento similar al evidenciado en el área de muestreo en Kennedy por las especies *Tecoma stans* y *Lafoensia acuminata*.

Finalmente, los resultados mostraron como las concentraciones de material particulado retenido por la especie *Quercus humboldtii* podrían considerarse como un indicador de la calidad del aire por contaminación de material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) en El Parque El Lago y en zonas con condiciones similares. Sin embargo, la evaluación de la contaminación por material particulado debe adelantarse bajo una escala de tiempo mensual; posibilitando establecer pronósticos preliminares del comportamiento de las concentraciones de material particulado en el mediano plazo.

#### **4.1.5 Análisis de regresión para las concentraciones de PST**

A partir de los resultados obtenidos en el análisis de correlación espacial en las dos áreas de estudio, se observó que las especies *Tecoma stans*, *Ligustrum lucidum* en Kennedy y la especie *Quercus humboldtii* en Barrios Unidos, presentaron correlaciones significativas; lo cual indicó cómo las concentraciones del material particulado retenido por las superficies foliares de estas especies podrían ser consideradas como un indicador del grado de contaminación atmosférica por material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) en las áreas de muestreo y en zonas con características similares.

Con base en lo anterior, se procedió a realizar un análisis de regresión entre las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) de las especies vegetales que presentaron correlaciones significativas y las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) reportadas por las estaciones de monitoreo en la escala temporal mensual, para identificar la ecuación de la tendencia que mejor representó el comportamiento entre las concentraciones de PST.

Los resultados indicaron como para la especie *Tecoma stans* el modelo lineal presento un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,78$ , indicando de esta manera como las concentraciones de PST retenidas por las superficies foliares explican en un 78% las concentraciones de PST promedio móvil mensual reportadas por la estación Carvajal (ver Tabla 11).

Por otro lado, para la especie *Ligustrum lucidum* el modelo lineal mostro un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,64$ , explicando en un 64% las concentraciones de PST reportadas por la estación Carvajal.

Lo anterior, indicó como la especie *Tecoma stans* explico en un mayor porcentaje (78%) las concentraciones de PST reportadas por la estación Carvajal.

**Tabla 11.**

*Coefficientes de determinación entre concentraciones de PST promedio mensual de especies vegetales y estaciones de monitoreo en Kennedy y Barrios Unidos.*

Especie	Modelo	Ecuación	$R^2$	Parámetros	
				a	b
<i>Tecoma stans</i>	Lineal	$PST_{cv}=a*PST_{Tc}+b$	0,78	-0,0326	123,89
<i>Ligustrum lucidum</i>	Lineal	$PST_{cv}=a*PST_{Lg}+b$	0,64	-0,0157	117,27
<i>Quercus humboldtii</i>	Lineal	$PST_{Sm}=a*PST_{Qh}+b$	0,57	-0,09333	28,73

Nota: Concentraciones de PST promedio móvil mensual estación Carvajal Kennedy ( $PST_{cv}$ ), concentraciones de PST promedio móvil mensual estación Simón Bolívar ( $PST_{Sm}$ ), concentraciones de PST promedio mensual especie vegetal *Tecoma stans* ( $PST_{Tc}$ ), concentraciones de PST promedio mensual especie vegetal *Ligustrum lucidum* ( $PST_{Lg}$ ), y concentraciones de PST promedio mensual especie vegetal *Quercus humboldtii* ( $PST_{Qh}$ ).

Fuente: Autor.

Finalmente, en el área de muestreo de las concentraciones de fondo (Parque El Lago), la especie *Quercus humboldtii* presento un coeficiente de determinación lineal de  $R^2 = 0,57$  el cual explico el 57% de las concentraciones de material particulado (PST) reportadas por la estación Simón Bolívar.

## 4.2 Comportamiento de las concentraciones de PST en especies vegetales y las estaciones de monitoreo

Para identificar diferencias entre las concentraciones de PST retenido por las especies que presentaron las correlaciones de Spearman ( $r$ ) significativas (*Tecoma stans*, *Ligustrum lucidum* y *Quercus humboldtii*), y entre las estaciones de monitoreo, se realizó una prueba no paramétrica de Friedman a las concentraciones de PST bajo la escala temporal mensual.

Los resultados de la prueba de Friedman mostraron diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las concentraciones de PST de las especies y entre las estaciones de monitoreo en la escala temporal mensual (ver Tabla 12).

**Tabla 12.**

Resultados de prueba de Anova de Friedman de las concentraciones de PST promedio mensual

Estación y Especie	Media	Rango promedio	Estadísticos de contraste	
Carvajal	106 µg/m <sup>3</sup>	2.67	Chi-cuadrado	21.950
Simón Bolívar	21 µg/m <sup>3</sup>	1.08		
<i>Tecoma stans</i>	545 µg/cm <sup>2</sup>	4.17	gl	4
<i>Ligustrum lucidum</i>	710 µg/m <sup>2</sup>	4.83	$\rho$ . asintót.	.000*
<i>Quercus humboldtii</i>	85,5 µg/cm <sup>2</sup>	2.25		

Nota: gl= Grados de libertad.  $\rho$  = Significancia estadística

\* = Exisnte significancia estadística

Fuente: Autor

Los anteriores resultados permitieron evidenciar como de las dos especies con mejores magnitudes de correlación de Spearman en Kennedy la especie *Ligustrum lucidum* presentó la mayor concentración promedio mensual de PST (710 µg/cm<sup>2</sup>), seguida por la especie *Tecoma stans* con 545 µg/cm<sup>2</sup>. En relación al mayor promedio de retención de PST de la especie *Ligustrum lucidum*, este se debió principalmente a una menor distancia (1,00 m), respecto de las fuentes de emisión; es decir, con respecto al tráfico vehicular. Lo anterior concuerda con lo reportado por Hagler et al. (2012) quien reporto que la cantidad de material particulado en las

hojas se vio afectada por la distancia entre el árbol y la carretera indicando como a menor distancia se presento una mayor retención de materia particulado PST.

Por otro lado, las concentraciones de PST promedio mensual de la especie *Quercus humboldtii* de  $85,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  fueron 7,3 veces menores al promedio mensual de las concentraciones en Kennedy (*Tecoma stans* y *Ligustrum lucidum*); siendo esta diferencia un indicador asociado a una peor calidad del aire en Kennedy por contaminación de material particulado (PST y  $\text{PM}_{10}$ ) y a una mejor calidad en Barrios Unidos. Lo anterior concordo con lo reportado por Criollo et al.(2016) quienes señalaron como las diferencias en las concentraciones de PST retenidas por las especies pueden ser un indicador de la calidad del aire y de la morbilidad en ambientes urbanos.

Por otro lado, la estación de monitoreo Carvajal-Kennedy durante los seis meses de estudio reporto una concentración promedio de  $106 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ver Tabla 12). En relación con los límites establecidos por la resolución 601 de 2006, las concentraciones superaron los niveles permitidos para PST anual (i.e,  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ); mientras que fueron inferiores para PST 24 horas (i.e,  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante todo el periodo de estudio.

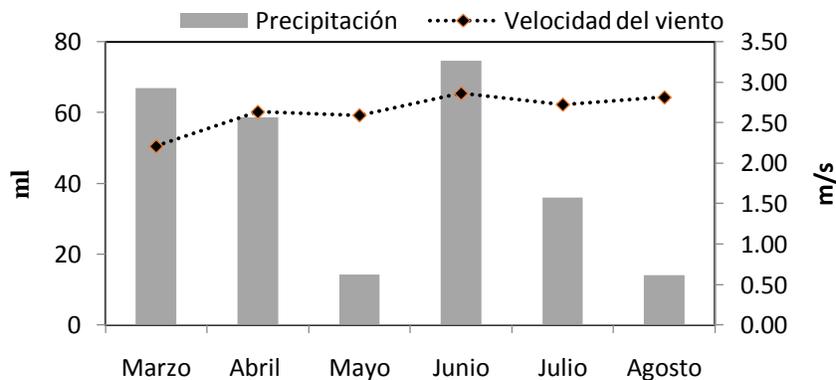
De igual manera, la estación Simón Bolívar durante este mismo periodo reportó un promedio mensual de  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el cual fue 5,04 veces menor respecto al promedio mensual de la estación Carvajal. Lo anterior indicó diferencias en el grado de contaminación atmosférica por material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y PST) entre las dos áreas de estudio (mejor calidad y peor calidad del aire), mostrando concordancia con la diferencia en la retención de PST entre las especies en Kennedy (*Tecoma stans* y *Ligustrum lucidum*) y *Quercus humboldtii* en Barrios Unidos. Finalmente, en relación a los límites (i.e,  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) establecidos por la resolución 601 de 2006, las concentraciones promedio mensuales de la estación Simón Bolívar fueron 4,7 y 14,2 veces inferiores a los límites establecidos para PST anual y PST para 24 horas (i.e,  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

#### 4.2.1 Influencia de la precipitación y velocidad del viento sobre las concentraciones de PST

En este acápite se presentan los resultados de la influencia de parámetros meteorológicos como la precipitación y velocidad del viento sobre la variación de las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ ) reportadas por las estaciones de monitoreo Carvajal-Kennedy, Simón Bolívar y las concentraciones retenidas por las especies vegetales con las mayores magnitudes de correlación en las dos zonas de estudio: *Tecoma stans* y *Quercus humboldtii*.

##### 4.2.1.1 Precipitación y velocidad del viento en Kennedy

Los registros de precipitación obtenidos durante el periodo de investigación (06/03/2015-23/08/2015) permitieron evidenciar la existencia de dos épocas para el análisis temporal de la precipitación: a) tiempo de aumento de la precipitación durante los meses de marzo, abril y junio, y b) tiempo de disminución de la precipitación durante los meses de mayo, julio y agosto (ver Figura 15). Es importante resaltar que durante los seis meses de investigación el país se encontró bajo los efectos del fenómeno climático conocido como “Fenómeno del niño”, por lo tanto las magnitudes de precipitación reportadas por las estaciones de monitoreo (Carvajal y Simón Bolívar) fueron bajas respecto a los registros históricos de los meses de muestreo.



**Figura 15.** Precipitación acumulada mensual y velocidad del viento promedio mensual en Kennedy.  
Fuente: Autor.

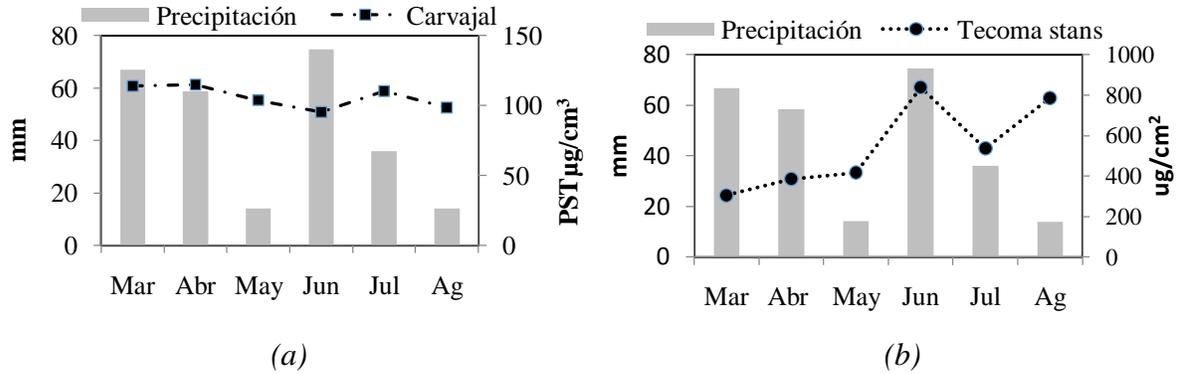
Los resultados mostraron como la precipitación acumulada durante el tiempo de mayores precipitaciones (201 mm) fue 3,1 veces mayor a la presentada durante el tiempo de menores precipitaciones (64 mm).

Por otro lado, la velocidad promedio mensual del viento durante el tiempo de investigación presentó valores entre 2,2 y 2,8 m/s, y una dirección dominante desde el sur (ver Figura 21); con un periodo de menor velocidad durante los meses de marzo, abril y mayo, y un periodo de mayor velocidad, durante los meses de junio julio y agosto (ver Figura 15).

Los resultados del análisis de la relación entre precipitación versus las concentraciones de PST reportado por la estación Carvajal (Spearman  $r = 0,19$ ) y la especie *Tecoma stans* (Spearman  $r = -0,07$ ), no mostraron una correlación significativa durante el tiempo de estudio (ver Figura 16).

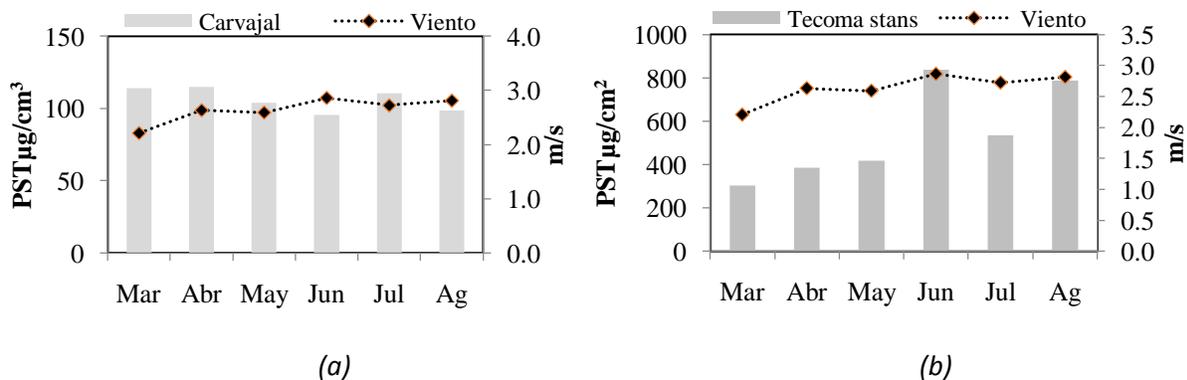
Respecto a otras investigaciones los anteriores resultados no presentaron concordancia con lo reportado por Torres et al .(2012) quienes reportaron que la precipitación es el principal sumidero (remoción por lluvia) local del material particulado en resuspensión ( $PM_{10}$  y PST).

Estos resultados posiblemente se encuentran asociados con una baja intensidad de las precipitaciones (Fenomeno del niño) durante el tiempo de muestreo limitando visulaizar cambios significativos desde el punto de vista mensual en la retención y reporte de PST por la especie *Tecoma stans* y la estación de calidad del aire Carvajal.



**Figura 16.** Variación de concentraciones de PST vs precipitación promedio móvil mensual, (a) concentraciones estación Carvajal vs precipitación promedio móvil mensual, (b) concentraciones PST especie *Tecoma stans* vs precipitación acumulada mensual.  
Fuente: Autor.

Por otro lado, los resultados del análisis de velocidad del viento versus las concentraciones de PST sugirieron una relación inversa fuerte (Spearman  $r = -0,88$ ,  $\rho: 0,01$ ), ya que al incrementarse la velocidad promedio mensual del viento se registraron menores concentraciones de PST en la estación Carvajal durante cinco de los seis meses de estudio (ver Figura 18). Lo anterior concuerda con lo señalado por Hagler et al.(2012), quienes reportaron un comportamiento inverso de las dos variables, a mayor material particulado ( $\text{PM}_{10}$  y PST) menor Velocidad del Viento y viceversa.



**Figura 17.** Variación de concentraciones de PST vs velocidad del viento promedio móvil mensual, (a) concentraciones estación Carvajal vs velocidad promedio móvil mensual, (b) concentraciones PST especie *Tecoma stans* vs velocidad del viento promedio móvil mensual.  
Fuente: Autor.

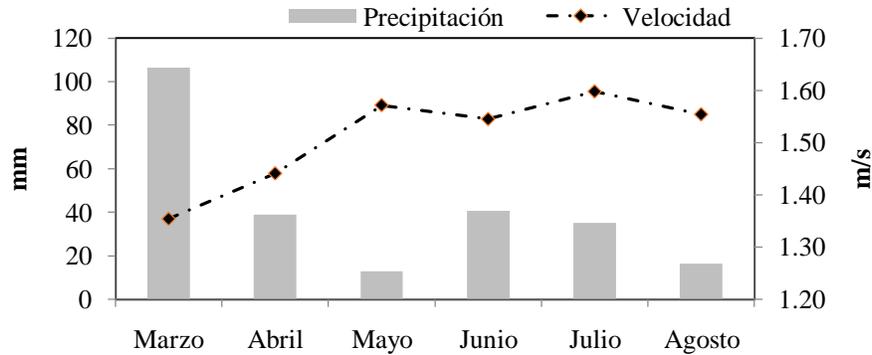
De igual manera, los resultados de la velocidad del viento versus las concentraciones de PST mensual de la especie *Tecoma stans* evidenciaron una relación directa fuerte (Spearman  $r = 0,94$ ,  $\rho: 0,00$ ) entre el incremento de las concentraciones de PST y el aumento de la velocidad del viento; mostrando como a mayor velocidad se presentaron mayores concentraciones de PST retenidas por las superficies foliares de la especie (ver Figura 18). De acuerdo con los anteriores resultados no se encontró diferencia con lo reportado en otros estudios (Rojas, 2014) evidenciando de esta manera como el parámetro velocidad del viento fue el principal factor climático determinante de la relación inversa entre las concentraciones de PST de la especie *Tecoma stans* y la estación Carvajal durante el tiempo de estudio.

Finalmente, los anteriores resultados posiblemente están influenciados por factores como: (i) la velocidad promedio mensual del viento que según la escala Beaufort fue leve, lo que favoreció la retención del material particulado por las superficies foliares; (ii) al incrementarse la velocidad del viento se redistribuyó el material particulado en re-suspensión sobre la vía en dirección del arbolado, lo que permitió una mayor retención por el follaje a lo largo de la vía, como resultado del incremento en la colisión de partículas de PST sobre la superficie foliar según lo expuesto por Steffens et al. (2012).

#### **4.2.1.2 Precipitación y velocidad del viento en Barrios Unidos**

En el área de muestreo de las concentraciones de fondo de PST los registros de precipitación obtenidos durante el periodo de investigación, permitieron evidenciar la existencia de dos épocas para el análisis temporal de la precipitación: a) tiempo de incremento de la precipitación durante

los meses de marzo, abril y junio, y b) tiempo de reducción de la precipitación durante los meses de mayo julio y agosto (ver Figura 18).



**Figura 18.** Precipitación acumulada mes y velocidad del viento promedio móvil mensual en Barrios Unidos.  
Fuente: Autor.

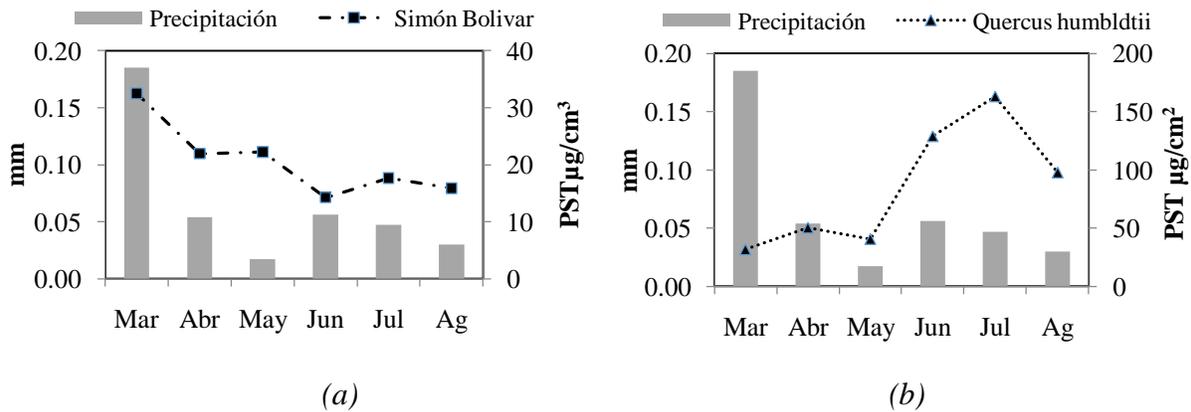
Los resultados mostraron, como la precipitación acumulada durante el tiempo de mayor precipitación (186 mm) fue 2,8 veces mayor a la presentada durante el tiempo de menor precipitación (65 mm).

Finalmente, el comportamiento de la precipitación en las dos zonas de estudio (i.e., Autopista sur Kennedy y Parque El Lago Barrios Unidos) mostro concordancia en los meses de mayor y menor precipitación, sin embargo la precipitación total acumulada en Barrios Unidos (251mm) fue 14 mm menor respecto a la precipitación en Kennedy (265mm).

Por otro lado, la velocidad del viento presentó valores dominantes entre 1,3 y 1,6 m/s, el cual según la escala de Beaufort se clasifico como ventolina o viento de muy baja intensidad (ver Figura 18).

Adicionalmente, la variación temporal de la velocidad del viento mostro reducciones durante los meses con mayores precipitaciones e incremento durante los meses con menor precipitación, lo cual se encuentra directamente relacionado con el incremento de la temperatura durante los periodos con menores lluvias, presentando coherencia con lo expuesto por Zafra et al. (2012).

Los resultados, del análisis de la precipitación versus las concentraciones de PST reportado por la estación Simón Bolívar (Spearman  $r = 0,17$ ) y la especie *Quercus humboldtii* (Spearman  $r = -0,14$ ) mostraron una debil relación (ver Figura 19); coincidiendo de esta manera con los resultados obtenidos en Kennedy entre la precipitación y las concentraciones de PST de las especies y la estación Carvajal durante el periodo de estudio.

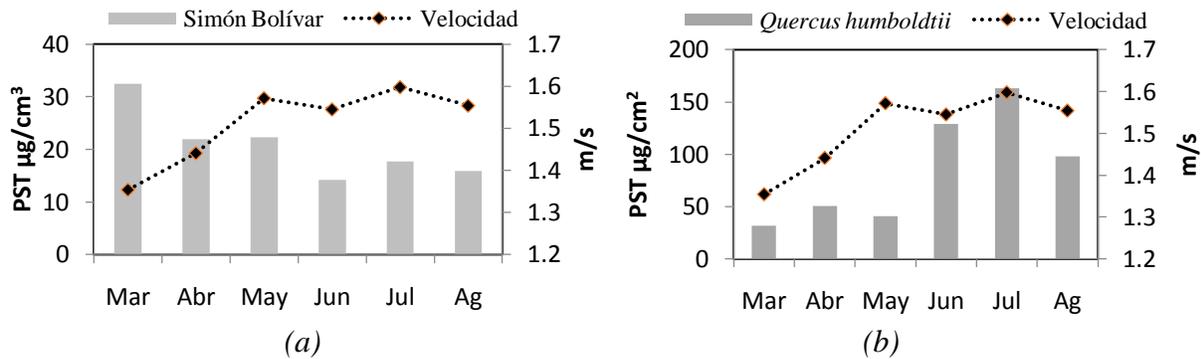


**Figura 19.** Variación de concentraciones de PST vs precipitación promedio móvil mensual, (a) concentraciones estación Simón Bolívar vs precipitación promedio móvil mensual, (b) concentraciones PST especie *Quercus humboldtii* vs precipitación promedio móvil mensual.

Fuente: Autor.

Por otro lado, los resultados del análisis de la relación entre la velocidad mensual del viento y las concentraciones de PST promedio móvil mensual reportadas por la estación Simón Bolívar mostraron relación inversa considerable ( $r = -0,81$ ,  $\rho: 0,02$ ); indicando de esta manera como a mayor velocidad del viento se reportaron menores concentraciones de PST mensual por la estación Simón Bolívar (ver Figura 20).

Lo anterior, presenta concordancia con los resultados evidenciados en Kennedy, por la estación Carvajal durante el periodo de estudio.



**Figura 20.** Variación de concentraciones de PST vs velocidad del viento promedio móvil mensual, (a) concentraciones estación Simón bolívar vs velocidad promedio móvil mensual, (b) concentraciones PST especie *Quercus humboldtii* vs velocidad del viento promedio móvil mensual.

Fuente: Autor.

De igual manera, los resultados de la relación entre la velocidad del viento y las concentraciones de PST mensual de la especie *Quercus humboldtii* (ver Figura 20), no evidenciaron relación significativa ( $r = 0,68$ ,  $\rho: 0,13$ ) como la mostrada por la especie *Tecoma stans* en Kennedy.

Lo anterior posiblemente se debe a la influencia del factor distancia (340 m) entre la estación de monitoreo Simón Bolívar y los arboles de la especie *Quercus humboldtii*; indicando de esta manera como para poder visualizar la relación entre las magnitudes de la variable climática viento reportada por la estación y las concentraciones de PST retenidas por las especies foliares es necesario establecer un área de muestreo inferior a 340 m de la estación.

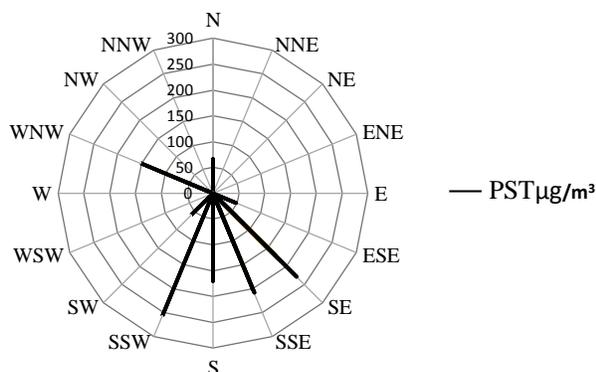
Finalmente, los resultados mostraron como de las dos variables climáticas (precipitación y Velocidad del viento) la velocidad del viento fue la variable que influyó de manera directa, en la relación inversa entre las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de las estaciones de monitoreo (Carvajal y Simón Bolívar) y las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenidas por las especies muestreadas en Kennedy (*Tecoma stans* y *Ligustrum lucidum*), ya que al incrementarse la velocidad del viento se redujeron las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) reportadas por las estaciones de monitoreo, y se incrementaron las concentraciones de PST ( $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) retenidas por

las especies vegetales durante el periodo de estudio. Sin embargo como lo señala Arciniégas (2011) se debe tener en cuenta que las condiciones de inversión térmica y las actividades antrópicas son condiciones que explican en parte el comportamiento del material particulado (PST y PM<sub>10</sub>).

#### **4.3 Relación entre las concentraciones de PST y la dirección predominante del viento en Kennedy**

Los resultados permitieron observar un comportamiento similar durante el 94 % de las observaciones (46 días), mostrando como durante este tiempo las direcciones del viento predominantes fueron SW, SSW, S, SSE y SE; seguidas por las direcciones N, WNW y ESE durante los tres días restantes (Ver Figura 22). Se evidenció relación durante 21 días de muestreo en los cuales las concentraciones de PST promedio diario registraron valores superiores a 100 µg/m<sup>3</sup> y las direcciones del viento fueron SSW, S, SSE y SE (ver Figura 21).

Este resultado se encontro, posiblemente asociado a emisiones de material particulado por combustión y abrasión, el alto tráfico vehicular de la vía en estudio y la Avenida Boyacá, esta última localizada a una distancia de 342 m de la estación de la RMCAB Carvajal. De igual manera, en estas direcciones se detectaron vías sin pavimentar (carrera 59ª sur en dirección S y carrera 57 sur en dirección SSE), las cuales evidenciaron un elevado flujo de transporte de carga pesada



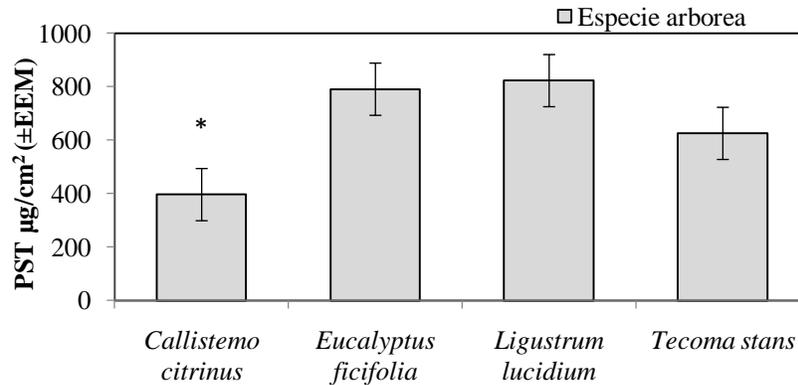
**Figura 21.** PST 24 horas reportado por la estación Carvajal Sony en Kennedy y la dirección de viento.  
Fuente: Autor.

Finalmente, como fuentes fijas generadoras de material particulado en suspensión en las direcciones del viento predominantes se detectó una zona clasificada como de uso industrial y comercial según el Plan de Ordenamiento Territorial de Bogotá D.C. del año 2004; con un importante número de industrias, las cuales emiten material particulado a través de sus diversos procesos y chimeneas (ver Anexo B, mapa 3 y figuras 9 y 10).

#### **4.4 Capacidad de retención de PST por las especies vegetales**

Para evaluar el desempeño en la retención de PST de las seis especies arbóreas muestreadas en las dos zonas de estudio, se determinó la capacidad de retención de material particulado; la cual indicó la cantidad de partículas sólidas totales captadas por la superficie foliar de la especie según lo expuesto por Alba et al. (2008).

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis permitieron observar diferencias significativas en las concentraciones de PST de la especie *Callistemo citrinus* (p-valor < 0,05), respecto de las tres especies restantes en Kennedy (ver Figura 23 y Anexo E, Figura 15). Esta especie presentó la menor capacidad de retención de PST ( $396,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) durante el tiempo de estudio.



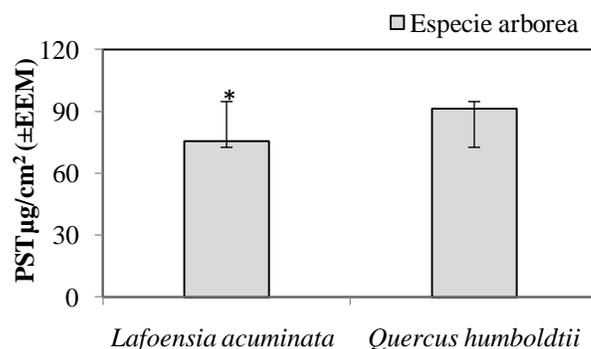
**Figura 21.** Capacidad de retención promedio de PST de las especies muestreadas en Kennedy

\* = La especie presentó diferencias significativas con un valor ( $p < 0,05$ )

Fuente: Autor.

Las especies *Ligustrum lucidum* ( $822,9 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), *Eucalyptus ficifolia* ( $790,7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) y *Tecoma stans* ( $625,4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) mostraron magnitudes de concentraciones de PST similares ( $p$ -valor  $> 0,05$ ); es decir, no existieron diferencias significativas entre estas especies en Kennedy (ver Figura 22).

Por otro lado, los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis en la zona de muestreo de las concentraciones de PST de fondo (Barrios Unidos) mostraron diferencias significativas entre las concentraciones de las especies *Lafoensia acuminata* ( $p$ -valor  $< 0,05$ ), con respecto a las concentraciones de *Quercus humboldtii* (ver Figura 23 y Anexo E, Figura 16).



**Figura 22.** Capacidad de retención de PST de las especies muestreadas en Barrios Unidos

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,05$ )

Fuente: Autor.

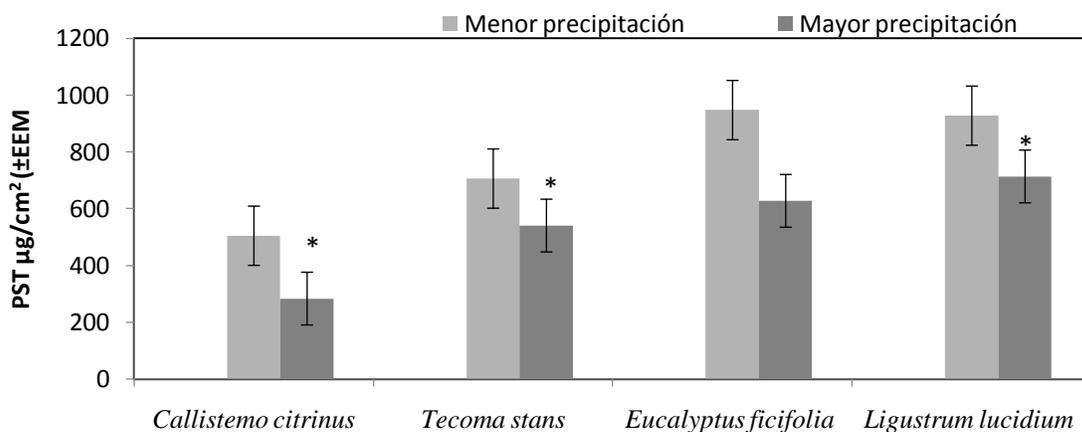
Los resultados permitieron observar cómo la especie con mayor retención promedio de PST durante el periodo de estudio fue *Quercus humboldtii* (91,3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) y la de menor retención fue *Lafoensia acuminata* (75,1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).

Finalmente, los resultados evidenciaron cómo las características físicas del área de estudio (p.e.j., diseño vial, el tráfico, y uso del suelo) probablemente influyeron en las diferencias entre las especies con mayor capacidad de retención de PST en Kennedy, con unas concentraciones de material particulado sobre las superficies foliares 8,1 veces mayor (746  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) con respecto de las concentraciones de la especie *Quercus humboldtii* (91,3  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) en Barrios Unidos. Lo anterior presentó relación con la clasificación del uso del suelo del P.O.T según la zona de estudio (i.e., autopista sur en Kennedy, uso comercial e industrial, y Parque El Lago Barrios Unidos, uso de equipamiento); sugiriendo como el tránsito vehicular, las actividades industriales y la infraestructura urbana asociada al uso de suelo pueden ser consideradas como las principales causas antropogénicas que incidieron en una mayor retención de PST de las especies en Kennedy. A este respecto los resultados presentaron concordancia con lo reportado por Steffens et al. (2012); Hagler et al. (2012); y Ugolini et al. (2013) quienes indicaron como el uso del suelo y alto tráfico vehicular fueron los principales factores causantes de unas mayores concentraciones de material particulado sobre las superficies foliares en ambientes urbanos.

#### **4.4.1 Influencia de la precipitación en la retención de PST por las especies vegetales**

Según análisis de los registros de precipitación horarios reportados por las estaciones de la RMCAB Carvajal-Kennedy y Simón Bolívar durante el periodo de investigación (06/03/2015-23/08/2015), se logró identificar como los meses con predominio de tiempo seco fueron: mayo, julio y agosto, y los meses con predominio de tiempo de lluvia fueron: marzo, abril y junio.

Los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis en Kennedy permitieron observar diferencias en la retención de PST por especie entre periodos lluvioso y seco ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) entre las especies *Callistemo citrinus*, *Ligustrum lucidium* y *Tecoma stans* (ver Anexo E Figura 17y 18). Durante el periodo lluvioso la especie *Callistemo citrinus* presentó la mayor afectación en la función de retención de PST, reduciendo la retención en un 43,8 %, seguida por las especies *Tecoma stans* con una disminución de un 23,4 %, y *Ligustrum lucidium* con 23,1 % (ver Figura 24).



**Figura 23.** Retención de PST por las especies ubicadas en Kennedy durante las temporadas de mayor y menor precipitación.

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,05$ ) durante el periodo.

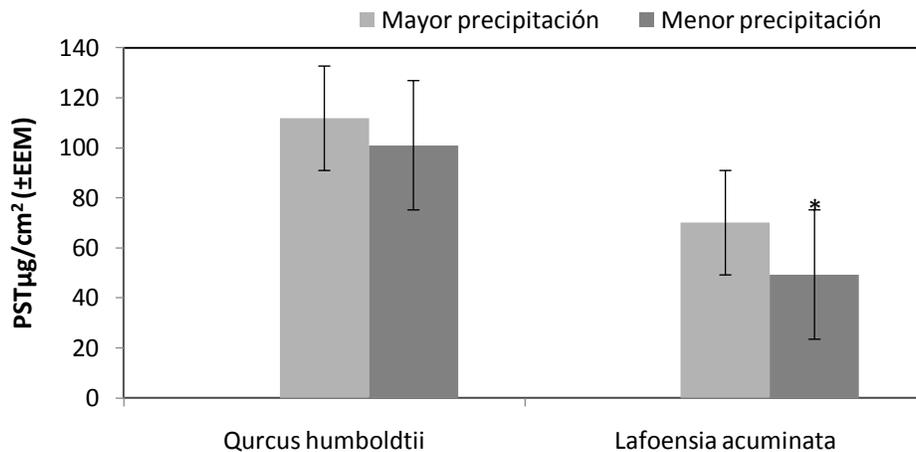
Fuente: Autor.

De igual manera, los resultados no evidenciaron diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) en la retención de PST de la especie *Eucalyptus ficifolia*, mostrando de esta manera una menor afectación en la función de retención de PST en esta especie al incrementarse las precipitaciones.

La función de retención de PST durante la menor precipitación no mostró diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre especies, indicando como la retención promedio de PST de las especies *Eucalyptus ficifolia* ( $947,4 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), *Ligustrum lucidium* ( $927,8 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ), *Tecoma stans* ( $706,2 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) y *Callistemo citrinus* ( $504,7 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) fueron estadísticamente similares. Al

respecto los anteriores resultados muestran con cordancia con Moreno. (2011) quien reporto un incremento en la retención de material particulado por las superficies foliares durante el periodo seco en zonas de mayo contaminación atmosférica.

Por otro lado, los resultados de la prueba de Kruskal- Wallis en el área de muestreo localizada en Barrios Unidos (Parque El Lago) evidenció diferencias significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) en la función de retención de PST de la especie *Lafoensia acuminata* durante las mayores precipitaciones, con respecto a las concentraciones durante el tiempo de menores precipitaciones (ver Figura 25).



**Figura 24.** Retención de PST por las especies ubicadas en el parque el lago durante las temporadas de mayor y menor precipitación.

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,05$ ) durante el periodo.

Fuente: Autor.

Así mismo, durante las mayores precipitaciones la especie *Lafoensia acuminata* presentó la mayor reducción (51,1 %) en la función de retención de PST, de las seis especies muestreadas en las dos zonas de estudio. Este resultado difirió de lo reportado por Jardín Botánico de Bogotá (2010), en donde señaló como la especie *Lafoensia acuminata* retuvo un 38 % más de material particulado durante el periodo húmedo. Lo anterior, posiblemente estuvo relacionado con: (I) una mayor exposición a altos niveles de contaminación, y (II) una mayor proximidad de las fuentes

generadoras de PST en los individuos de las especies muestreadas por el Jardín Botánico de Bogotá D.C.

Por otro lado, los resultados permitieron observar como durante las menores precipitaciones las especies *Lafoensia acuminata* y *Quercus humboldtii* no mostraron diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) en la función de retención de material particulado, indicando de esta manera una capacidad de retención similar, siendo este comportamiento igual al registrado por las especies muestreadas en Kennedy.

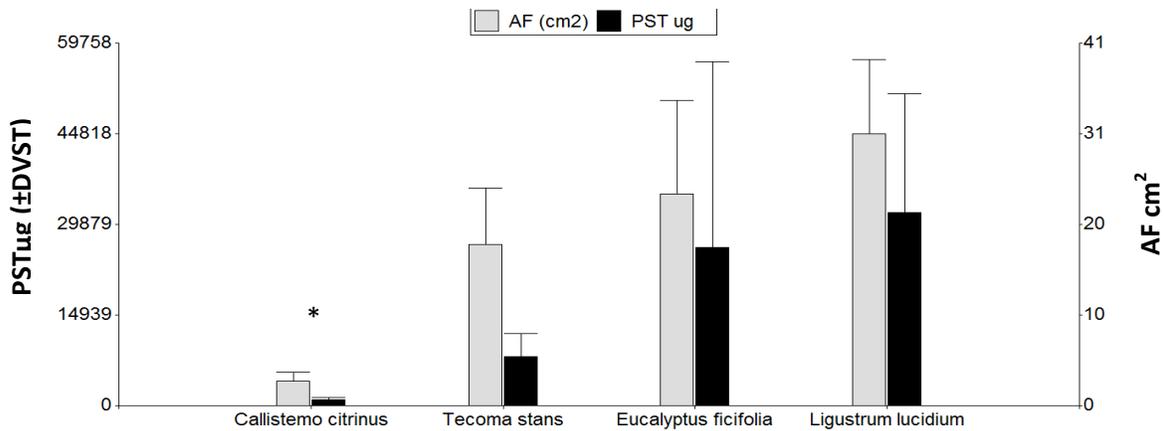
Finalmente, en la relación temporada-especie, los anteriores resultados concuerdan con lo reportado por Alcalá et al. (2010) quien señaló que las condiciones atmosféricas dominantes durante la temporada de menores precipitaciones, junto con la constante emisión de material particulado son dos factores determinantes en la presencia de mayores concentraciones de PST sobre las superficies foliares. Con respecto a lo anterior, Behrentz (2009) indicó que al disminuirse la precipitación se limita el efecto que esta tiene en el balance de masas atmosférico (i.e., sumidero local por la remoción del material particulado en resuspensión), por lo tanto se incrementan las concentraciones de material particulado en resuspensión (PST).

#### **4.4.2 Relación entre la retención de PST por la especie vegetal y su arquitectura foliar**

Para evaluar la relación entre la capacidad de retención de PST y la arquitectura foliar de las especies muestreadas en las dos zonas de muestreo, se estudiaron los rasgos de la arquitectura foliar: (i) área foliar (AF), (ii) relación entre el largo máximo foliar (LMF) versus ancho máximo foliar (AMF), (iii) forma de hoja, y (iv) tipo de superficie foliar.

#### 4.4.2.1. Evaluación de la retención de PST en especies vegetales y su área foliar

Para el área foliar promedio (AF), los resultados de la prueba de Kruskal-Wallis mostraron una diferencia significativa ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) en la especie *Callistemo citrinus*, con un AF promedio ( $2,7 \text{ cm}^2$ ) significativamente menor respecto al AF de las cinco especies restantes (ver Figura 26). Lo anterior presentó relación con la menor retención promedio de PST por esta especie ( $790 \mu\text{g}$ ) durante el tiempo de estudio en Kennedy, indicando de esta manera como una menor superficie foliar de exposición generó una menor acumulación de material particulado.



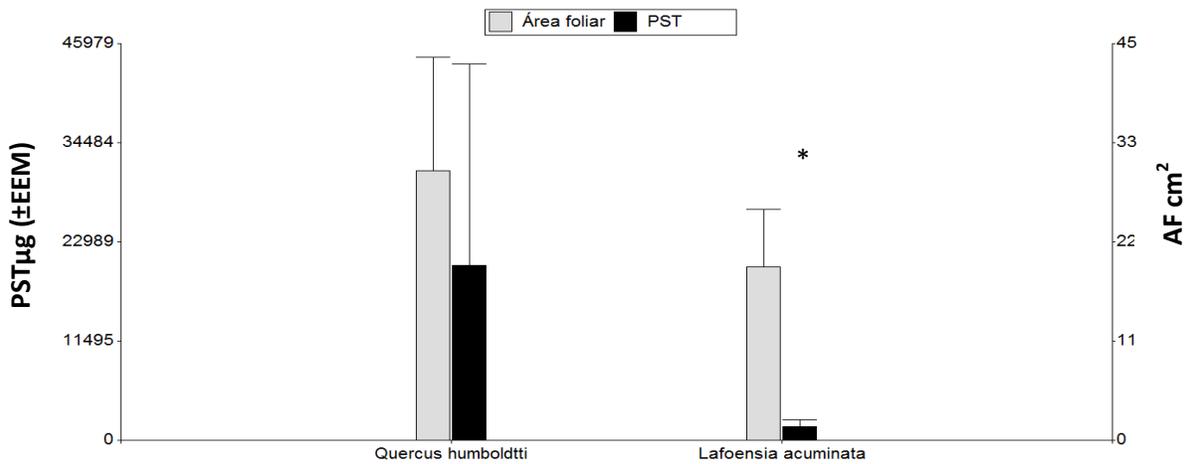
**Figura 25.** Área foliar promedio de las especies muestreadas en Kennedy

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,001$ )

Fuente: Autor.

De igual manera, los resultados permitieron observar como el AF promedio y la retención de PST promedio de las especies con mayor capacidad de retención de PST en Kennedy: *Ligustrum lucidium* (AF de  $30,62 \text{ cm}^2$ ), mostro diferencias significativas ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) respecto de las especies *Tecoma stans* (AF de  $18,03 \text{ cm}^2$ ) y *Eucalyptus ficifolia* (AF de  $23,78 \text{ cm}^2$ ). Los anteriores resultados presentaron concordancia con lo expuesto por Chipaco et al. (2015); Duran (2009); y Moreno et al. (2011), quienes reportaron que las especies con mayor superficie de exposición (área foliar) interceptan mayor cantidad de PST.

Por otro lado, las especies *Lafoencia acuminata* en la zona de las concentraciones de material particulado de fondo (Parque El Lago), con un AF promedio de 20.2 cm<sup>2</sup> mostro diferencias significativas (p-valor < 0,05) respecto al AF y la retención de PST de la especie *Quercus humboldtti*, presentando concordancia con la menor retención promedio de PST 1212 µg (ver Figura 27).



**Figura 26.** Área foliar promedio de las especies muestreadas en Barrios Unidos

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,05$ )

Fuente: Autor

Finalmente, la especie *Quercus humboldtii* presento un AF promedio de 33,2 cm<sup>2</sup> la cual fue mayor respecto al area promedio de las tres especies con mayor retención en Kennedy (26 cm<sup>2</sup>), sin embargo su retención de PST promedio (1463 µg) fue 8 veces menor a la retención de PST promedio de las tres especies con mayor retención en Kennedy (12413 µg).

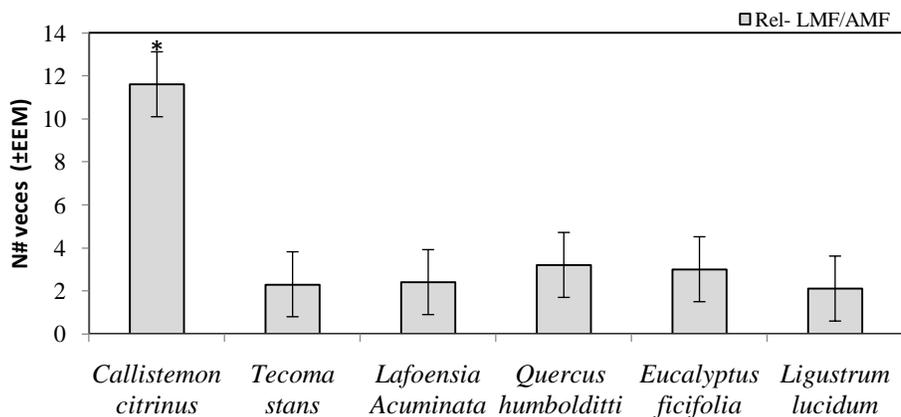
#### 4.4.2.2 Análisis del largo máximo y ancho máximo foliar de las especies vegetales

Los resultados de la prueba de Kruskal–Wallis permitieron observar diferencias significativas en la relación LMF/AMF de la especie *Callistemo citrinus* (p-valor < 0,05), con respecto a la relación LMF/AMF de las cinco especies restantes; con un LMF 11,6 veces mayor al AMF de las especies *Tecoma stans*, *Ligustrum lucidium*, *Eucalyptus ficifolia*, *Quercus humbolditti* y

*Lafiensia acuminata* (ver Figura 28). Lo anterior presentó concordancia con la menor capacidad de retención de PST mostrada por la especie en Kennedy, y con lo reportado por Jhosi et al. (2011), quien señaló como una forma foliar muy alargada favorece la pérdida de material particulado como resultado de un mayor movimiento de las hojas por la acción del viento.

Por otro lado, los resultados mostraron como la relación foliar (LMF/AMF) no presentó diferencias significativas ( $p$ -valor  $> 0,05$ ) entre las especies *Tecoma stans* y *Lafiensia acuminata*, y entre las especies *Quercus humboldtii* y *Eucalyptus ficifolia* (ver Figura 28).

Finalmente, los resultados permitieron observar como una relación geométrica foliar en la que el largo máximo foliar LMF no sea 3,2 veces mayor al ancho máximo foliar AMF, como lo evidenciaron las especies con mayor capacidad de retención de PST: *Ligustrum lucidum*, *Eucalyptus ficifolia*, *Tecoma stans* y *Quercus humboldtii*; constituyen un rasgo foliar determinante en la retención de PST por la superficies foliares de las especies. Lo anterior coincidió con lo reportado por Hable et al. (2012) quien reportó que los árboles con hojas anchas son acumuladores efectivos de material particulado.



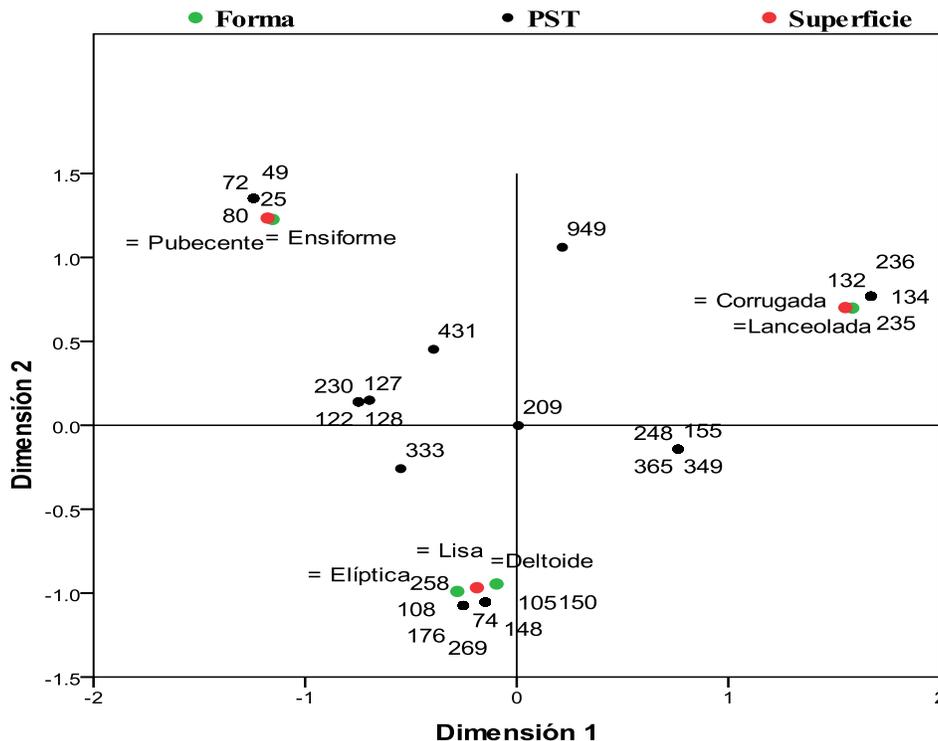
**Figura 27.** Relación largo máximo foliar (LMF), ancho máximo foliar (AMF) de las especies muestreadas en Kennedy y Barrios Unidos

\* = La especie presentó diferencia significativa con un valor ( $p < 0,05$ )

Fuente: Autor.

#### 4.4.2.3 Análisis del tipo de superficie y forma foliar

Los resultados del análisis correspondencial evidenciarán en primer lugar cercanía entre la forma foliar ensiforme (hoja en forma de espada), el tipo de superficie foliar pubescente y las menores concentraciones de PST retenidas durante el periodo de estudio (ver Figura 28). Lo anterior mostro relación con la menor capacidad de retención de PST realizada por la especie *Callistemo citrinus* en Kennedy la cual presentó superficie foliar pubescente, siendo esta característica como lo propone Steffens et al. (2012), fundamental en la retención de PST. Sin embargo, su forma foliar alargada con una relación en la que el largo máximo foliar (LMF) supero 11,6 veces el ancho máximo foliar; favoreció la perdida del material particulado, principalmente por la acción del viento, concordando con lo señalado por Moreno et al. (2011).



**Figura 28.** Gráfico conjunto de puntos de categorías del análisis correspondencia de la forma, tipo de superficie foliar y retención de PST de las especies muestreadas en Kennedy y Barrios Unidos.  
Fuente: Autor.

Por otro lado, los resultados evidenciaron cercanía entre la forma foliar lanceolada (hoja ancha en la mitad basal), el tipo de superficie foliar corrugada y unas concentraciones promedio de PST entre ( $132 \mu\text{g}/\text{cm}^2$  y  $236 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) (ver Figura 28). Lo anterior mostro relación entre la forma foliar de la especie *Eucalyptus ficifolia* (lanceolada) y el tipo de superficie de foliar de la especie *Tecoma stans* (corrugada), concordando de esta manera con los resultados de la prueba de Kruskal–Wallis (p-valor > 0,05) la cual no mostro diferencia significativa en la capacidad de retención de PST entre estas especies.

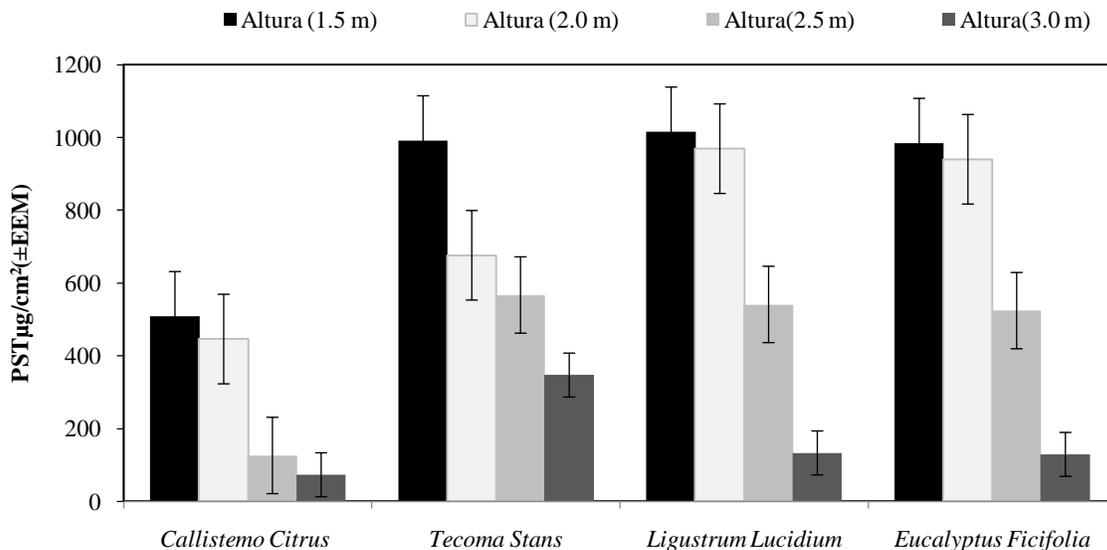
Finalmente, se visualizo una cercanía en la retención de PST entre la superficie foliar lisa y las formas foliares elíptica (hoja ancha en la mitad) y deltoide (hoja de forma triangular), mostrando de esta manera similitud entre las especies *Ligustrum lucidum*, *Eucalyptus ficifolia* y *Lafoensia acuminata*, en el tipo de superficie foliar, como entre las especies *Quercus humboldtti* y *Tecoma stans* en la forma foliar (deltoide). Respecto a las menores concentraciones de PST estas se relacionaron con las especies *Quercus humboldtti* y *Lafoensia acuminata* ya que las magnitudes de retención de PST corresponden a las muestreadas en el área de las concentraciones de fondo (Barrios Unidos).

#### **4.5 Retención de PST a diferentes alturas por el arbolado en Kennedy**

Para evaluar de manera preliminar el comportamiento vertical del material particulado (PST y  $\text{PM}_{10}$ ) retenido por las superficies foliares de las especies estudiadas en la Autopista sur (*Tecoma stans*, *Callistemo citrinus*, *Eucalyptus ficifolia* y *Ligustrum lucidum*), se procedió a realizar un muestreo foliar a distintas alturas de la copa (1,50 m, 2,00 m, 2,50 m y 3,00 m) a dos árboles tipo por cada una de las cuatro especies evaluadas. Los resultados permitieron observar una tendencia en la reducción de las concentraciones de material particulado (PST y  $\text{PM}_{10}$ ) halladas sobre las

superficies foliares de las especies al incrementarse la altura de muestreo en 0,5 m (ver Figura 29).

Así mismo, la retención promedio de material particulado realizada por las cuatro especies fue 1,15 veces mayor ( $875 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) a 1,50 m de altura, a la realizada a 2,00 m con una concentración de  $758 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ . De igual manera, la retención promedio de PST a 2,50 m de  $439 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , fue 1,72 veces menor a la encontrada a 2,00 m de altura y 2 veces menor a la retenida a 1,50 m (ver Figura 29). Adicionalmente los resultados mostraron como las concentraciones de PST y  $\text{PM}_{10}$  retenidas por las especies a 3,00 m ( $170 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) fueron 5,14 veces menores con respecto a las retenidas a 1,50 m de altura ( $875 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ ).



**Figura 29.** Retención de PST a distintas alturas por las especies muestreadas en Kennedy  
Fuente: Autor.

Finalmente, el comportamiento de las concentraciones de material particulado PST retenido por las especies vegetales evidenció unas mayores concentraciones entre 1,50 m y 2,00 m de altura, lo cual pudo estar relacionado con la presencia de mayores niveles de material particulado en re-suspensión en este rango altitudinal en la vía durante el periodo de estudio. Lo anterior, como

resultado de una menor altura respecto a las fuentes móviles emisoras de material particulado (i.e., los escapes de vehículos); lo cual junto con la turbulencia inducida por el tráfico incrementan la suspensión del material particulado, propiciando unas mayores concentraciones de exposición y deposición de este sobre las superficies foliares localizadas entre los 1,50 m y 2,00 m de altura. De acuerdo con los anteriores resultados no se mostraron diferencias con lo reportado por Clipaco et al. (2015); Maher et al. (2008) quienes señalaron que las mayores concentraciones de PST fueron detectados en las hojas situadas a una altura entre 0,3 y 2 m por encima de la superficie de la carretera. Lo anterior debido a que al generarse una reducción de la turbulencia por debajo de los 3,00 m, se disminulle el flujo de los contaminantes y se incrementa la sedimentación de los mismos.

## 5. CONCLUSIONES

- Con respecto a la relación entre las concentraciones de PST de las especies vegetales y las estaciones de calidad del aire, los resultados indican como en la escala temporal mensual se presentan las mejores correlaciones en las especies: *Tecoma stans*, y *Ligustrum lucidum* en Kennedy, y *Quercus humboldtii* en Barrios Unidos. Lo anterior, indica como estas especies pueden ser consideradas como indicadoras de la calidad del aire por contaminación de material particulado (PM<sub>10</sub> y PST) en áreas urbanas, permitiendo hacer una primera aproximación de carácter cuantitativo en áreas donde no existen registros continuos o recursos para la adquisición de equipos automáticos de monitoreo; sin embargo, los resultados sugieren que el registro del material particulado sobre las superficies foliares permite inferir el grado de contaminación bajo una escala mensual. Es decir, la evaluación posibilita realizar un seguimiento de la calidad del aire a mediano plazo.
- Las especies con mayor capacidad de retención de PST: *Ligustrum lucidum*, *Eucalyptus ficifolia* y *Tecoma stans* en Kennedy, y *Quercus humboldtii* en Barrios Unidos, poseen un alto potencial mitigador del impacto ambiental generado por las emisiones de partículas atmosféricas en corredores viales urbanos, ya que las características intrínsecas de su follaje ( mayor área foliar, hojas anchas, superficie pubescente y corrugada) , remueven considerables cantidades de partículas atmosféricas potencialmente respirables (PM<sub>10</sub> y PST); lo cual contribuye de forma significativa en la mejora de la calidad del aire y, por lo tanto, de la salud pública urbana.
- Los resultados muestran una fuerte relación entre la velocidad del viento y las concentraciones de PST en las dos zonas de estudio, indicando como al incrementarse la

velocidad del viento se presenta una mayor retención de material particulado por las superficies foliares de las especies.

- La retención de PST por las especies entre el periodo seco y húmedo (lluvioso) muestra diferencias significativas, ya que durante el periodo seco se favorece la retención de PST por las especies, siendo esta un 31 % mayor a la retenida durante el periodo húmedo. Por lo tanto, los resultados sugieren como al incrementarse las precipitaciones existe remoción del material particulado suspendido y retenido por las superficies foliares; y como durante el periodo seco, se genera un aumento de los efectos negativos sobre la salud de los residentes y transeúntes de los corredores viales en estudio por presencia de mayores concentraciones de material particulado ( $PM_{10}$  y PST).
- Las especies con mayor capacidad de retención de PST indican como un área foliar (AF) mayor, con una superficie foliar corrugada, pubescente, y liza favorecen una mayor retención de PST. Sin embargo, la relación largo máximo foliar (LMF) y ancho máximo foliar es un atributo determinante en la retención de material particulado, ya que una relación en la que el LMF no supere en más de 3,2 veces el AMF posibilita una mayor retención de material particulado ( $PM_{10}$  y PST) por las superficies foliares; ya que las hojas menos alargadas son acumuladoras efectivas de material particulado.
- Finalmente, los resultados sugieren como en el estudio del material particulado depositado sobre las superficies foliares dirigido a la caracterización de fuentes emisoras de PST y  $PM_{10}$ , el establecimiento de líneas de tiempo igual o mayor a seis meses en zonas cercanas, permite evaluar con mayor certeza la variación y distribución temporal del contaminante emitido por las fuentes móviles (el tráfico) y fijas (industrias).

## 6 RECOMENDACIONES.

- Para evaluar la relación entre las concentraciones de PST retenidas por las especies arbóreas y las concentraciones de PST reportadas por las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en corredores viales urbanos, se recomienda establecer una distancia de muestreo foliar menor a 147 m entre las especies y las estaciones de monitoreo, realizando como mínimo dos muestreos semanales durante un periodo de seis meses. De esta manera, se garantiza la representatividad de los datos y la significancia de la correlación. Adicionalmente, se recomienda que el análisis se realice a mediano plazo (desde el punto de vista mensual), ya que en el corto plazo (diario y semanal) no se lograron evidenciar tendencias satisfactorias; tal como se logró identificar en el análisis de correlación espacial en la presente investigación.
- Los resultados preliminares del análisis estratificado de la retención de PST por las especies en Kennedy sugieren complementar los resultados de esta investigación con un muestreo estratificado (diferentes alturas) de la retención de PST durante un periodo de seis meses en el área de estudio de las mayores concentraciones de PST, con el fin de evaluar de manera detallada la distribución vertical de la retención de material particulado por las especies; permitiendo de esta manera la obtención de información preliminar para el planteamiento de un diseño de coberturas arbóreas encaminado a mejorar la calidad del aire en las zonas con mayor presencia de este contaminante en la ciudad de Bogotá D.C.
- Finalmente, es necesario adelantar un estudio centrado exclusivamente en la determinación del potencial de las especies vegetales evaluadas en esta investigación, con respecto a la captura de metales pesados Pb, Cd, Cu, y Fe asociados al material

particulado (PST y  $PM_{10}$ ) durante un periodo de seis meses en las dos zonas de estudio. Lo anterior permite evaluar la relación entre factores como: área de muestreo, temporada climática y tipo de especie, y acumulación de metales pesados; lo cual posibilita la utilización de las especies con mayor capacidad de captura de metales pesados como un indicador y mitigador eficiente de los efectos adversos sobre la salud pública ocasionados por estos contaminantes en ambientes urbanos.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- Alba, M. (2008). Bioindicador de contaminación por Sólidos en Suspensión a lo largo de un gradiente de Urbanización en la Ciudad de San Juan. *Ciencia vol 3, N° 7* , 101- 108.
- Alcaldía Mayor de Bogotá.D.C. (2011). *Decreto 623 de 2011 Por medio del cual se clasifican las áreas-fuente de contaminación ambiental Clase I, II y III de Bogotá, D.C., y se dictan otras disposiciones*. Bogotá D.C.
- Alcalá, R.-O. A.-M.-G. (2010). Potencial de retención de polvo atmosférico en tres especies vegetativas del ecosistema semiárido, San Luis Potosí, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* .
- Alcaldía local de Kennedy. (2012). *Plan Ambiental Local Kennedy*. Bogotá D.C.
- Anze, F. Z. (Junio de 2007). *Revista virtual Redesma*. Obtenido de Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia: <http://revistavirtual.redesma.org/vol1/articulo3.htm>
- Anze, R., & Fraken, M. (2007). *Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia*. Obtenido de <http://revistavirtual.redesma.org/vol1/articulo3.htm>
- Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico Y Control De Material Particulado Partículas Suspendedas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul* .
- Arciniégas, C. S. (2011). *Diagnóstico Y Control De Material Particulado: Partículas Suspendedas Totales Y Fracción Respirable Pm10*. Manizales.
- Badii, M. H., Cerna, E., Guillen, A., & Valenzuela, J. (2011). Nociones Introductorias de Muestreo Estadístico. *International Journal of Good Conscience* .
- Banco Mundial. (2000). <http://www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm>. Recuperado el 26 de 05 de 2015, de <http://www.bancomundial.org/temas/cities/datos.htm>.
- Beckett, P. F. (2000). Particulate pollution uptake by urban trees: effect of species and windspeed.
- Beckett, P. (1998). Particulate pollution removal by Urban Trees.
- Behrentz, E. (2009). *Relevancia Ambiental del Sistema de Transporte Público Bogotá como caso de estudio*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.
- Belarcazar, L. C., & Manzini, A. (2007). *Estimación de los factores de Emisión de las fuentes móviles de la Ciudad de Bogotá*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes .
- Beltran, D. F. (2012). *"Emisiones vehiculares de material particulado (PM2.5 y PM10) por resuspensión de polvo y abrasión en Bogotá"*. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia.

- Bogotá, Pagina Oficial de la Ciudad. (2013). *Ubicacion de la Ciudad*. Obtenido de <http://www.bogota.gov.co/tag/pot>
- Brown, C. D. (2005). *Construcción De Modelos De Estimación De Biomasa Y Área Foliar Para Diez Especies Arbóreas Urbanas De La Ciudad De Santiago*. Santiago-Chile.
- Cabezas, M. G. (2009). *Un Modelo Para La Estimación Del Área Foliar En Tres Especies Forestales*.
- Camara de Comercio de Bogotá . (2013). *Informe Economico*. Bogotá.
- Chen, Y., Lucas, P., & Wellburn, A. (1990). *Relative relationship between foliar injury and change in antioxidants levels in red and Norway spruce exposed to acidic mists*. Environmental Pollution.
- Chipaco Zanchéz, J. G., & Vanlecia Rodriguez, F. (2015). *Determinación De La Capacidad De Adsorción De Material Particulado En El Aire En Una Especie Arbórea Schinus Terebinthifolius Y Una Rastrera Aptenia Cordifolia En El Condominio La Quebrada - Cieneguilla*.
- COMPES. (2008). *Lineamientos para la Formulación de la Política Integral de Salud Ambiental con Énfasis en los Componentes de Calidad de Aire*. Bogotá D.C.: Departamento Nacional De Planeación.
- Consorti sanitari de Barcelona. (2011). *Los óxidos de nitrógeno (NOx) en el aire urbano y la salud*. Barcelona.
- Criollo, C., Assar, R., Caceres, D., & Prendez, M. (2016). *Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile*. *Rev Chil Enferm Respir* .
- Dalmansson, A., Candia, R., & Llera, j. (1997). *La vegetación como indicadora por contaminación de polvo atmosferico*. Mendoza España.
- DANE. (2013). *Producto Interno Bruto por Regiones, a precios corrientes*. Bogotá D.C.
- Dimitri, M., & Orfila, E. (1980). *Tratado de morfología y sistematica vegetal* . Madrid: ACME S.A.C.I.
- Duran Rivera, D. (2009). *Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos en el valle de aburrá*.
- Espinosa, M. (2005). *Caracterización del Material Particulado en vías de Transporte público Colectivo y masivo en Bogotá*. Bogotá : Universidad de los Andes .
- FAO. (2009). XIV Congreso Forestal Mundial.
- Freer Mith, A. E. (2004). *Capture of particulate pollution by trees: A comparison of Species Typical of semi- arid areas with European and Nort American Species*. Water air soil Pollution.
- Gaitan, M. (2007). *Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá*.

- Gayle S.W. Hagler, M.-Y. L. (2012). Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions. *Science of the Total Environment* .
- González, J. d. (2003). Rediseño de la red para monitoreo de la calidad del aire en los municipios de Ibagué, Espinal y San Luis - Payande. Bogotá: Universida de la Salle.
- Guzman, J. D. (2003). *Rediseño De La Red Para El Monitoreo De Calidad Del Aire En Los*. Bogotá D.C.
- Hagler, G., Lin, M., Khystov, A., Baldauf, R., Isakov, V., Faircloth, J., y otros. (2012). Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions.
- Harrison, R. M. (2003). *Introducción a la química medioambiental y a la contaminación*. Zaragoza España: Acribia, S.A.
- Hervario Nacional de Bolivia . (2012). *Protocolo para la medición de características funcionales Proyecto Inventario Florístico de la Región Madidi*. La Paz.
- Hospital del sur . (2011). *Analisis situación de salud localidad Kennedy*. Bogotá.
- IDEAM. (2005). *Documento Soporte de la Norma de Calidad del Aire*. Obtenido de [http://www.minambiente.gov.co/documentos/1748\\_Resumen\\_ejecutivo.pdf](http://www.minambiente.gov.co/documentos/1748_Resumen_ejecutivo.pdf)
- Jardin Botánico de Bogotá. (2010). *Manual de silvicultura Urbana*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colomba.
- Jardín Botánico de Bogotá. (2010). Realizar la validación de un protocolo para el cálculo de materiales particulados.
- Jardin Botánico José Celestino Mutis. (2010). *Realizar la validación de un protocolo para el cálculo de materiales particulados en áreas de mayor contaminación de Bogotá* . Bogotá D.C.
- Jhosi, N., & Bora, M. (2011). Impact of air quality on physiological attributes of certain plants. *Report and Opinion* , 42-47.
- Kulmala, M. (2001). *On the formation, growth and composition of nucleation*. Helsinki, Finland.
- La Contaminación Atmosférica*. (s.f.). Obtenido de Efectos de los Contaminantes Atmosféricos: <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf6b.html>
- Larner, B. (2004). *Colombia. Cost of Environmental Damage: A socio-economic and Environmental Health Risk Assessment*.
- Mariano, S. C. (2002). *Tratado de contaminación atmosférica. Problemas, tratamiento y gestion*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Mello, A. L. (2006). *Análisis comparativo del área foliar específica de gramíneas dominantes en pastizales naturales bajos regímenes contrastantes de pastoreo*. . Montevideo.

- Ministerio de Cultura. (05 de 08 de 2015). *Instituto Colombiano de Antropología e historial*. Recuperado el 05 de 08 de 2015, de Instituto Colombiano de Antropología e historial: <http://www.icanh.gov.co/?idcategoria=5137>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2010). *RESOLUCIÓN 0610*. Bogotá.D.C.
- Ministerio del Medio Ambiente. (2010). *Decreto 610*. Bogotá.
- Ministerio del Medio Ambiente. (1995). *Decreto 948*. Bogotá.
- Miravittles, M. (2001). El coste de las enfermedades pulmonares crónicas obstructivas en España. Opciones para una obtimización de recursos. *Sciencie Direct volumen 37* , 388- 393.
- Mith, A. E. (2004). *Capture of particulate pollution by trees: A comparison of Species Typical of semi-arid areas with European and Nort American Species*. Water air soil Pollution.
- Mora, J. A., García, E., & Enríques, J. F. (2004). *Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno de pasto*. Mexico .
- Moreno, G. M. (2008). Bioindicador de Contaminación por Sólidos en Suspensión a lo largo de un Gradiente de Urbanización en la Ciudad de San Juan. *Ciencia, Vol. 3, Nº 7* , 101 - 108.
- Moreno, G., & Martinez, E. (2011). Análisis de la distribución espacial y temporal del particulado solido en suspensión según tamaño en el arbolado urbano de Sanjuan y Mendoza. *Contaminación atmosferica e Hidrica en Argentina* .
- Moreno, M. D. (2003). *Toxicologia Ambiental: Evaluación del riesgo para la salud Humana*. Madrid: MCGRAW HILL/ INTERAMERICANA DE ESPAÑA.
- Moreno, M. D. (2003). *Toxicoogia Ambiental: Evauación del riesgo para la salud Humana*. Madrit: MCGRAW HILL/Interamericana de España.
- Noel, E. (2000). *Air Pollution Control Engineering*. Singapore: Second Edition, McGraw Hill.
- Nowak, D. E. (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *URBAN FORESTRY URBAN GRENING* .
- Nowark, K. R. (2000). *A modeling Study of the impact of urban trees on azone*. New york: Rey atmos, Environ.
- OMS. (Septiembre de 2011). *Calidad del aire y salud*. Obtenido de OMS: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- OMS. (2004). *Guia para la calidad del aire* . Lima Peru.
- OMS. (06 de 04 de 2016). *Organización Mundial de la Salud*. Obtenido de Organización Mundial de la Salud: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>
- Ospina, D. (2001). *Introducción al muestreo*. Bogotá: Universidad nacional de Colombia.

- Peña, C. E., Carter, D. E., & Ayala, F. (2001). *Toxicología Ambiental: Evaluación del riesgo y Restauración Ambiental*. Phoenix: The University of Arizona.
- Pérez Amaro, J. A., & García Moya, E. (2004). *Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto mulato (Brachiaria híbrido)*. México.
- Pignata, M. (2003). *Empleo de Biomonitoreos en estudios de contaminación atmosférica*. La Paz.
- Planeación Nacional. (2002). *Compes 3185*. Bogotá D.C.
- Ramos, C. F. (2006). *Caracterización del material particulado en las principales vías del transporte público colectivo y masivo del centro de Bogotá*. Bogotá D.C.
- Ramos, M. C. (2007). *Flujo vehicular y respuesta eco-fisiológica del arbolado urbano en Bogotá D.C.* Bogotá D.C.
- Rincón, G. N. (2012). *Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional*.
- Rincón, N., & Olarte, M. A. (2012). *Determinación del Área Foliar en Fotografías Tomadas con una Cámara Web, un Teléfono Celular o una Cámara Semiprofesional*. Medellín.
- RM CAB. (2012). *Informe año 2012*. Bogotá.
- Rojas, N. (2014). Aire y problemas ambientales de Bogotá. *Universidad Nacional de Colombia*.
- Sánchez, E., Kulsum, A., & Yewande, A. (2006). *Prioridades Ambientales Para la Reducción de la Pobreza en Colombia*. Bogotá: Mayol Ediciones S.A.
- Scheffer, R., & Mendenhall, W. (2007). *Elementos de Muestreo*. Madrid España: Paraninfo.
- SDA. (05 de 03 de 2015). *Secretaría Distrital de Ambiente*. Recuperado el 05 de 03 de 2015, de Observatorio Ambiental de Bogotá: <http://oab.ambientebogota.gov.co/index.shtml?s=1&id=272>
- Secretaría de Ambiente de Bogotá. (05 de 03 de 2014). *Observatorio Ambiental de Bogotá*. Recuperado el 05 de 03 de 2014, de <http://oab.ambientebogota.gov.co/index.shtml?s=1&id=272>
- Secretaría de Hacienda Distrital. (2004). *Barrios Unidos Diagnóstico físico y socioeconómico*. Bogotá D.C.
- Secretaría de Movilidad. (2012). *Movilidad en cifras*. Bogotá D.C.
- Secretaría de Movilidad. (2011). *Movilidad en Cifras*. Bogotá.
- Secretaría de Planeación Distrital de Bogotá D.C. (2000). *Plan de Ordenamiento Territorial Bogotá 2000-2015*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá. (2008). *Numero de Fiestas Fijas*.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). *Informe Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá.

- Secretaria Distrital de Ambiente. (2011). *Informe Calidad del Aire de Bogotá*. Bogotá.
- Secretaria Distrital de Cultura Recreación y Deporte. (2008). *Localidad de Kennedy Ficha basica*. Bogotá D.C.
- Secretaria Distrital de Gobierno. (08 de Junio de 2015). *Alcaldia Local Barrios Unidos*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.barriosunidos.gov.co/index.php/mi-localidad/conociendo-mi-localidad/ficha-tecnica>
- Secretaria Distrital de Gobierno. (08 de Junio de 2015). *Alcaldia Mayor de Bogotá*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.kennedy.gov.co/index.php/mi-localidad/conociendo-mi-localidad>
- Secretaria Distrital de Planeación. (26 de 05 de 2015). *Bogota.cov.go Secretaria Distrital de Planeación*. Recuperado el 26 de 05 de 2015, de <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/InformacionTomaDecisiones/Estadisticas/RelojDePoblacion>
- Seoanez, M. (2002). *Tratado de contaminación atmosférica*. España: Mundi Prensa.
- Sierra, M. M. (2006). Establecer La Asociación Existente Entre Las Variables Meteorológicas Temperatura, Velocidad Del Viento Y precipitación Y Las Concentraciones De Pm10 registradas En La Red De Calidad Del Aire De Bogota D.C.
- Smithsonian Institution. (1999). *Manual of Leaf Architecture morphological description of dicotyledonous end net veined monocotyledonous angiosperms*.
- Steffens, Y. J. (2012). Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment* .
- T, J. (2012). Exploration of effects of a vegetation barrier on particle size distributions in a near-road environment. *Atmospheric Environment* .
- Tintinalli, J. (2005). *Medicina de Urgencias*. Madrid: Mac Graw Hill.
- Toro, M. V., & Marin, A. V. (Junio de 2006). Relación entre las concentraciones de partículas totales y respirables. *Producción + Limpia* .
- Torres, Y. A., & Rodríguez, I. G. (2012). *Análisis de tendencia de la concentración de MTP en aire asociados con la fase suspendida y sedimentable de los corredores viales (Soacha Cundinamarca)*. Bogotá D.C.: Tesis de Grado.
- Tyler, N., Acevedo, J., & Bocarejo, J. P. (2013). *Características de la Contaminación Atmosférica en Colombia*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes .
- Ugolina, F. R. (2013). Quercus ilex L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: Effectiveness of leaf washing with distilled water and considerations on the tree distance from traffic. *Urban Forestry & Urban Greening* .

- UIS. (2013). *Sistema de Gestion Ambiental*. Obtenido de Legislacion Ambiental - Aire:  
<http://www.uis.edu.co/webUIS/es/gestionAmbiental/legislacionAmbiental/aire.html>
- Unidad de Calidad Ambiental, I. d. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *REDESMA* , 25.
- Univerisidad Nacional Autónoma de Mexico. (2011). *Tecnicas de Muestreo para Manejadores de Recursos Naturales* (Segunda ed.). Mexico: Hecho en Mexico.
- Universidad de Chile. (2004). *Aplicacion de modelos de dispersion atmosferica en la evaluacion del impacto ambiental* . Santiago.
- Universidad de los Andes. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C.: UCL.
- Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (08 de Junio de 2015). *Pagina Principal*. Recuperado el 08 de Junio de 2015, de <http://www.udistrital.edu.co/universidad/colombia/bogota/caracteristicas/>
- Universidad Javeriana. (1999). *Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años*. Bogotá D.C.
- Universidad Nacional de la Plata. (2000). *La hoja de las plantas morfologia y adaptaciones*. Buenos Aires.
- Universidad NAcional de la Plata. (2000). *La hoja de las plantas morfologia y adaptaciones*. Buenos Aires.
- Universidad Nacional. (2010). *Calidad del Aire*. Bogota.
- Universidad Nacional de La Plata. (2006). *La hoja de las plantas morfología y adaptación* .Buenos Aires
- VDI. (1991). Verein Deutscher Ingenieure. *Measurement and evaluation of phytotoxic effects of ambient air pollutants (immissions) with lichens: Method of standardized lichen exposure* . , 14.
- Vilela. (2004). Distribución del arbolado urbano en la ciudad de Fuenlabrada y su contribución a la calidad del aire. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales* .
- Visual, S. d. (2011). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire Auditiva Y Visual*.
- Wang, L. J. (2006). Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city. *Chinese Ecol Environ* .
- Zafra Megía, C. A., Palacio Soto, D. F., & Rodríguez Miranda, J. P. (2014). Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* .
- Zafra Mejía, C. A., Ángel, Y., & Torres, E. (2017). analysis of the effect of land surface coverage on PM10 concentrations in a high-altitude megacity. *Atmospheric pollution Research* .

Zafra Mejía, C. A., Rodríguez Chitiva, L. G., & Torres Cabrera, Y. A. (2012). Metales pesados asociados con las partículas atmosféricas y sedimentadas de superficies viales: Soacha (Colombia). *Ciencia e Ingeniería* , 144.

## ANEXO A

Normatividad asociada a la investigación.

**Tabla 1**

*Legislación Nacional y Distrital sobre calidad del aire.*

A NIVEL NACIONAL		
NORMA	ENTIDAD	OBJETO
D. 948 de 1995	Presidencia	Por el cual se reglamenta la normatividad en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire.
R. 910 de 2008	Min Ambiente	Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres.
R. 610 de 2010	Min Ambiente	Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.
R. 650 de 2010	Min Ambiente	Se adopta el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.
A NIVEL DISTRITAL		
R. 391 de 2001	Alcaldía de Bogotá D.C.	Normas técnicas y estándares ambientales para la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire en el perímetro urbano de la Ciudad de Bogotá D.C.
R. 1208 de 2003	SDA	Dicta normas sobre prevención y control de la contaminación atmosférica por fuentes fijas y protección de la calidad del aire.
D. 174 de 2006	Alcaldía de Bogotá D.C.	Por medio del cual se adoptan medidas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire en el Distrito Capital.
D. 98 de 2011	Alcaldía de Bogotá D.C.	Por el cual se adopta el Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá.

D. 623 de 2011	Alcaldía	de	Clasificación fuentes de contaminación ambiental: clase I (Contaminación alta: Bogotá D.C. Puente Aranda, Kennedy, Bosa), II (media: Candelaria, Mártires, San Cristóbal), III (baja: Barrios Unidos, Santa Fe, Chapinero).
D. 531 de 2010	Alcaldía	de	Por el cual se reglamenta la silvicultura urbana, zonas verdes y la jardinería en Bogotá D.C. Bogotá y se definen las responsabilidades de las entidades distritales en relación con el tema y se dictan otras disposiciones.
Acuerdo 435 de 2010	Concejo	de	Por medio del cual se dictan lineamientos para ampliar la cobertura arbórea en parques y zonas verdes de equipamientos urbanos públicos.

## **ANEXO B**

### **4.1 Cartografía áreas de muestreo y registro fotográfico.**

En el presente anexo se presenta la cartografía del área de las dos áreas de muestreo en las cuales se adelanta la presente investigación. En su orden se encontraran los siguientes mapas:

- Mapa **1** de área de muestreo de las mayores concentraciones de PST, sobre la autopista sur Kennedy.
- Mapa **2** de área de muestreo de las concentraciones de fondo de PST, localizada en el parque el lago, localidad de Barrios Unidos.
- Mapa **3** uso del suelo y coberturas, de las zonas aledañas al área de muestreo en Kennedy.

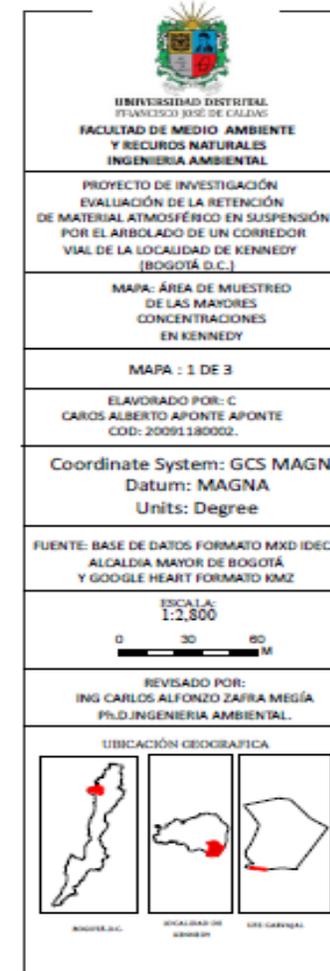
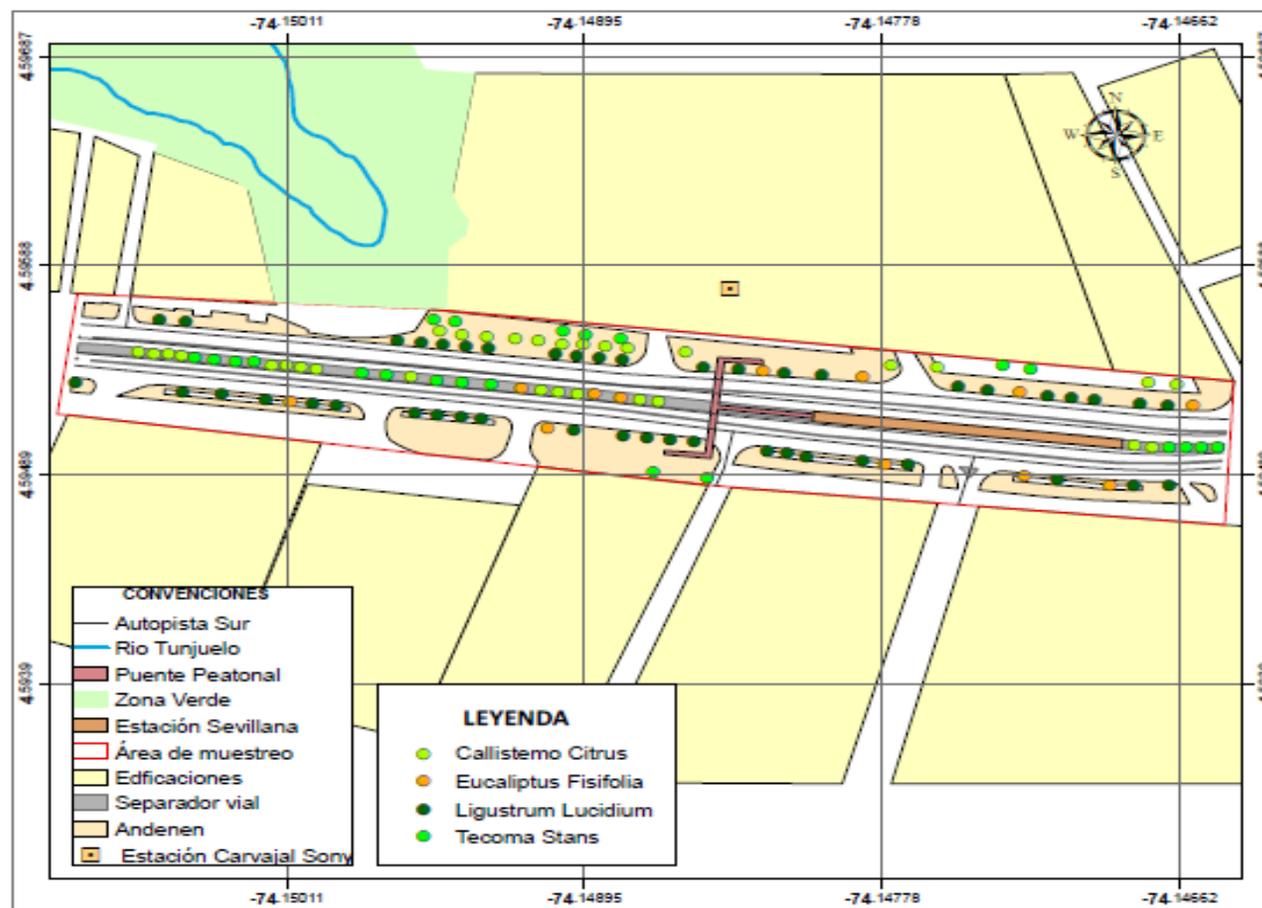
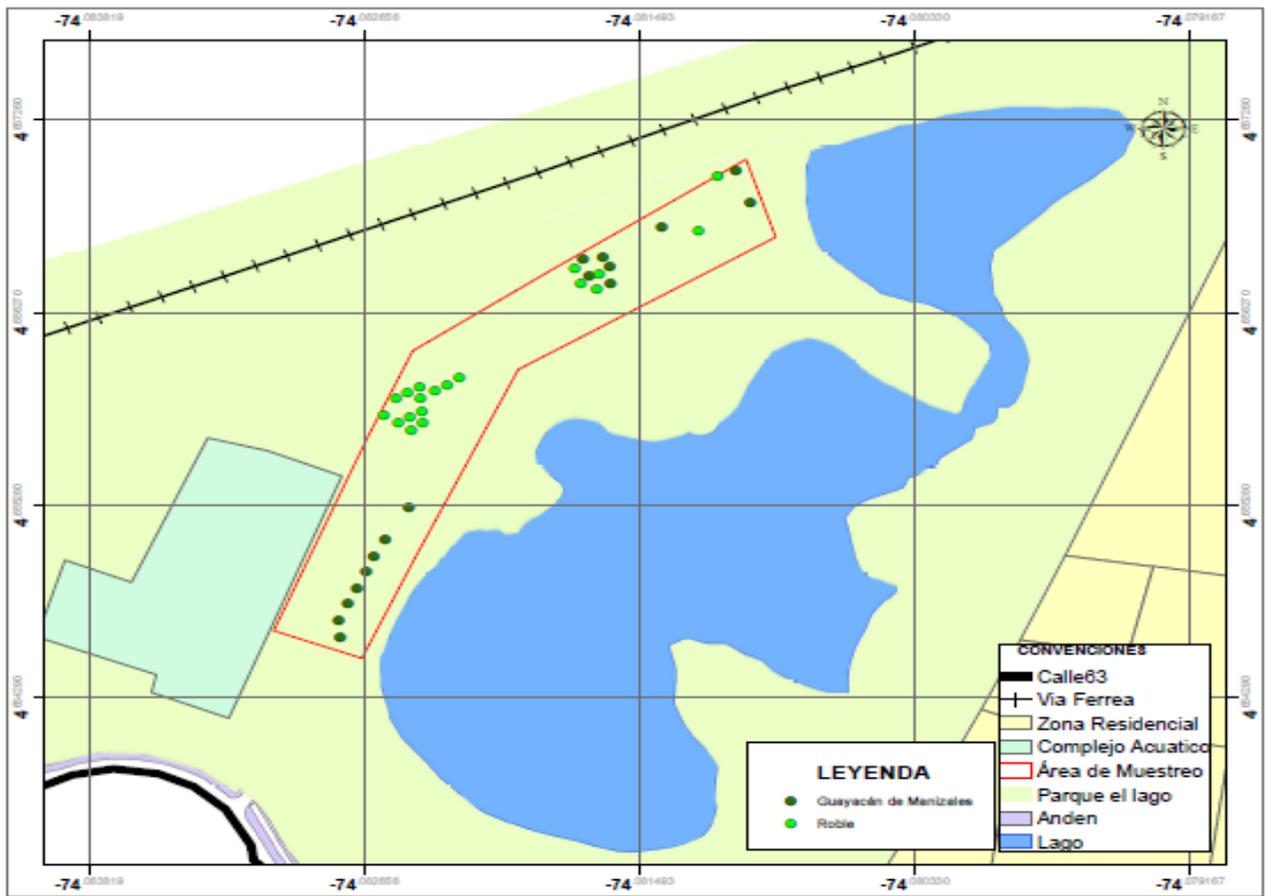


Figura 1. Mapa “Área de muestreo de las mayores concentraciones de PST I, autopista sur localidad de Kennedy”



  
**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**  
**FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES**  
**INGENIERIA AMBIENTAL**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN  
 EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE MATERIAL ATMOSFÉRICO EN SUSPENSIÓN POR EL ARBOLADO DE UN CORREDOR VIAL DE LA LOCALIDAD DE KENNEDY (BOGOTÁ D.C.)

MAPA: ÁREA DE MUESTREO DE LAS CONCENTRACIONES DE FONDO, PARQUE EL LAGO, LOCALIDAD BARRIOS UNIDOS

**MAPA : 3 DE 3**

ELABORADO POR: C CARLOS ALBERTO APONTE APONTE  
 COD: 20091180002.

Coordinate System: GCS MAGNA  
 Datum: MAGNA  
 Units: Degree

FUENTE: BASE DE DATOS FORMATO MXD IDEICA ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ Y GOOGLE HEART FORMATO KMZ

**ESCALA: 1:3,000**  


REVISADO POR: ING CARLOS ALFONZO ZAIRA MECÍA  
 P.D.INGENIERIA AMBIENTAL.

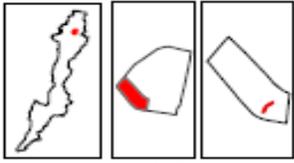
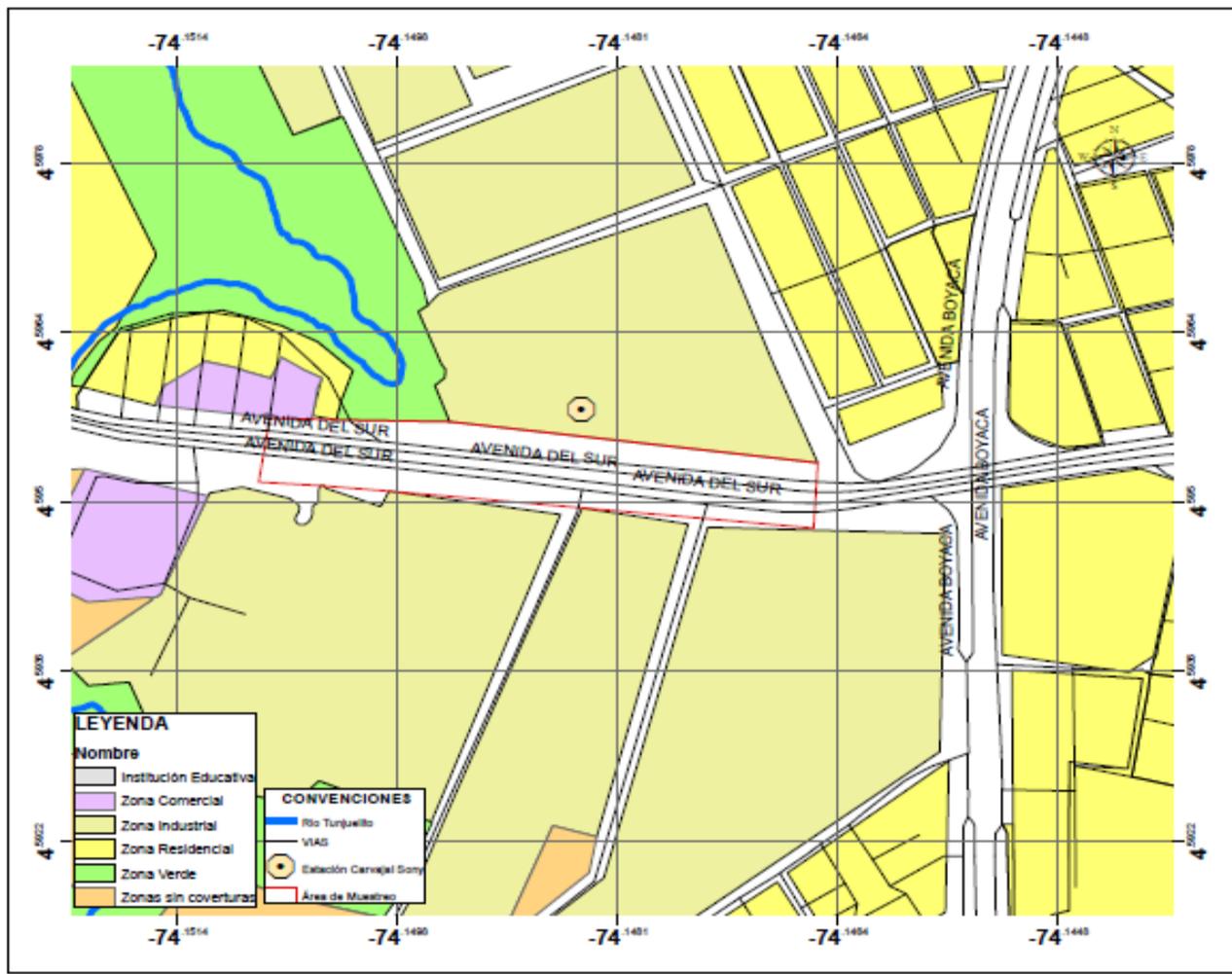
**UBICACIÓN GEOGRAFICA**  


Figura 2. Mapa2 “Área de muestreo de las concentraciones de fondo de PST, parque el lago, localidad de Barrios Unidos.”



  
**UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**  
**FACULTAD DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**  
**EVALUACIÓN DE LA RETENCIÓN DE MATERIAL ATMOSFÉRICO EN SUSPENSIÓN POR EL ARBOLADO DE UN CORRIDOR VIAL DE LA LOCALIDAD DE KENNEDY (BOGOTÁ D.C.)**

**MAPA: USO DE SUELO Y COBERTURAS EN ZONAS CERCANAS AL ÁREA DE MUESTREO EN KENNEDY**

**MAPA : 3 DE 3**

ELABORADO POR: C CARLOS ALBERTO AÑONTE AÑONTE  
 COD: 2009180002

Coordinate System: GCS MAGNA  
 Datum: MAGNA  
 Unita: Degree

FUENTE: BASE DE DATOS FORMATO MXD IDECA  
 ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ  
 Y GOOGLE HEART FORMATO KMZ

**ESCALA:**  
**1:5,000**



REVISADO POR:  
 ING CARLOS ALFONZO ZAPRA MECÍA  
 Ph.D. INGENIERIA AMBIENTAL

**UBICACIÓN GEOGRAFICA**

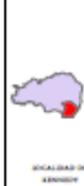
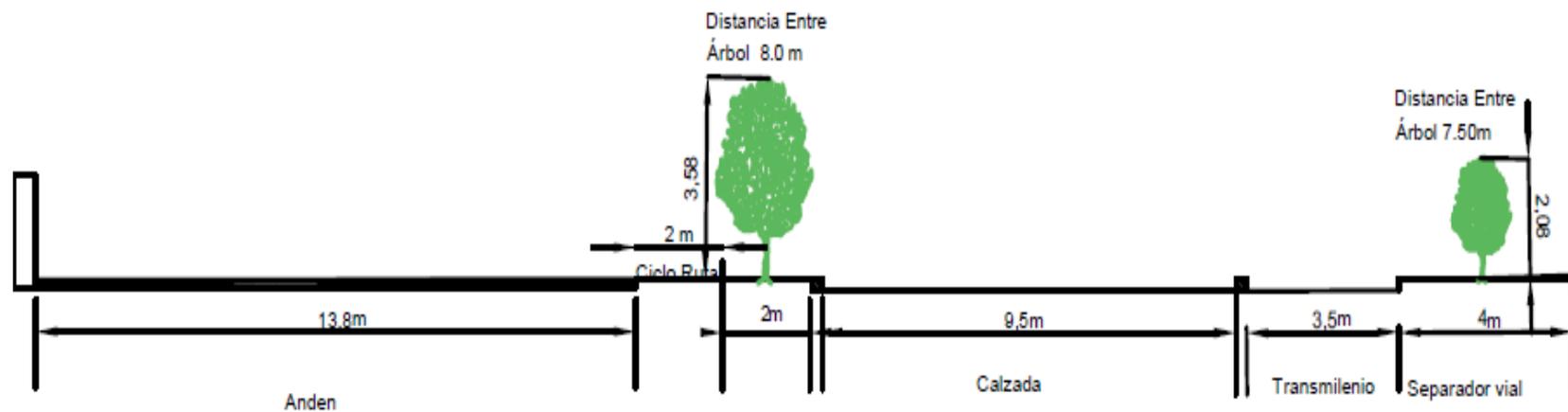
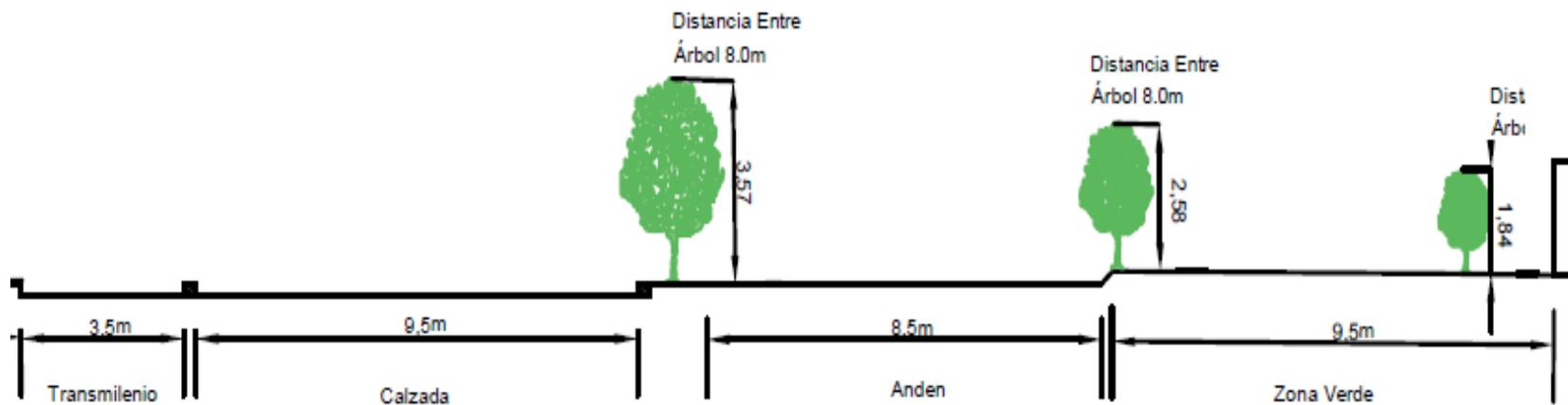




Figura 3. Mapa 3 “Uso actual y coberturas de zonas cercanas al área de muestreo en Kennedy.”



**Figura 4.** Esquema del área de muestreo, localizada sobre la autopista sur. Plano oriental, circulación de vehículos y transeúntes de sur a norte.



**Figura 5.** Esquema del área de muestreo, localizada sobre la autopista sur. Plano occidental, circulación de vehículos y transeúntes de norte a sur.

## Registro fotográfico áreas de muestreo



**Figura 6.** Vista del flujo vehicular área de muestreo de PST retenido por el arbolado en la autopista sur. Kennedy



**Figura 7.** Arbolado y emisiones de material particulado en el área de muestreo autopista sur Kennedy.



**Figura 8.** Zonas destinadas al tránsito de peatones y diseño de arbolado autopista sur. Área de muestreo Kennedy.



**Figura 9.** Industrias de producción de calzado y jabones. Sobre la autopista sur. Kennedy.



**Figura 10.** Cerveza Bavaria y Frigorífico localizados sobre el área de muestreo. Autopista sur Kennedy.



**Figura 11.** Retención de material particulado por las especies muestreadas en Kennedy. Especie *Ligustrum Lucidum*.



**Figura 12.** *Especies muestreadas en el área de las concentraciones de fondo. Parque el lago Localidad Barrios Unidos.*



**Figura 13.** *Árboles muestreados en el parque el lago. Localidad de Barrios Unidos.*



**Figura 14.** *Zonas aledañas, al área de muestreo de las concentraciones de fondo. Parque el lago.*

## **ANEXO C**

A continuación se presentan los procedimientos detallados para la obtención de la información en campo y en laboratorio.

### **PROCEDIMIENTO No 1**

#### **TOMA DE MUESTRAS EN CAMPO**

##### **1. Objetivo**

Determinar las concentraciones de PST presentes en las áreas de estudio, mediante el análisis de la retención de PST realizado por las superficies foliares de las especies evaluadas en las dos zonas de muestreo.

##### **2. Equipos y materiales especiales**

**2.1.** Cinta métrica.

**2.2.** Bolsas ziplock.

**2.3.** Nevera de icopor.

**2.4.** Guantes de Nitrilo.

**2.5.** Tapa bocas.

**2.6.** Resaltador y marcador.

**2.7.** Bitácora de árboles a muestrear.

**2.8.** Plano de localización de cada individuo de la especie en las zonas de muestreo.

### **3. Procedimiento**

**3.1.** Previamente mediante el uso del software Microsoft Excel, se determinaran los individuos a muestrear por día (dos árboles por especie). Para esto se corre el modelo aleatorio sistemático simple (MAS). Posteriormente se imprime la bitácora con el código del árbol a muestrear, el nombre de la especie, el área de localización dentro de la zona de muestreo, y la fecha de muestreo.

**3.2.** Una vez en campo 15 minutos antes de la hora de muestreo (i.e. , 9:00 am y 10:00 am) se debe proceder a determinar la localización de los árboles a muestrear, mediante la corroboración del código del árbol según la especie, registrado en la bitácora, y el código del árbol presente en el plano detallado de las áreas de estudio.

#### **3.3. Toma de muestras foliares.**

**3.3.1.** Previamente a la toma de muestras se debe proceder a la colocación de los guantes y el tapabocas para prevenir la inhalación y contacto con el material particulado retenido por las superficies foliares, y las altas concentraciones de PST presentes en el área de muestreo en Kennedy, principalmente.

**3.3.2.** Identificar el árbol y la especie a muestrear, mediante la corroboración de la ubicación del individuo en el plano detallado.

**3.3.3.** Determina la altura de muestreo midiendo 2.00 m desde el piso a la copa del árbol.

**Nota:** Este procedimiento se repite en cada dirección cardinal.

**3.3.4.** Colectar al azar una muestra de cuatro hojas sanas expuestas. Para la colección de las hojas, estas se deben tomar una por una por el peciolo de forma suave para evitar la pérdida del material retenido, colocándolas en la bolsa ziplock correspondiente a la muestra.

**Nota:** Este procedimiento se repite en cada dirección cardinal hasta completar 16 hojas por árbol.

**3.3.5.** Marcar la muestra con la fecha, el código del árbol y el nombre de la especie.

**3.3.6.** Depositar la muestra colectada en la nevera de icopor.

**3.3.7.** Repetir el procedimiento desde el punto **3.2.2**, hasta completar los ocho árboles a muestrear por día de estudio. Este procedimiento se debe realizar durante un periodo de tiempo máximo de 40 minutos.

**3.3.8.** Una vez terminada la toma de muestras en Kennedy hay que dirigirse al área de muestreo de las concentraciones de fondo en Barrios Unidos (Parque el Lago) y repetir el procedimiento desde el punto **3.2** al **3.3.7**.

#### **4. Preservación de las muestras**

Una vez colectadas las muestras en campo, estas se deben depositar en recipientes herméticos secos para ser puestas en nevera a 4°C por 4 días hasta ser transportadas al laboratorio para su tratamiento.

## **PROCEDIMIENTO No 2**

### **DETERMINACIÓN DE PST Y ÁREA FOLIAR EN LABORATORIO**

#### **1. Objetivo**

Remover el material particulado (PST) retenido por las especies y obtener el área foliar muestreada.

#### **2. Equipos y materiales especiales**

**2.1.** Pincel de cerdas finas.

**2.2.** Agua desionizada.

**2.3.** Bomba manual con capacidad para 750 cm<sup>3</sup>.

**2.4.** Vaso de precipitado de 250 ml, y embudo de vidrio con diámetro de 12,00 cm

**2.5.** Balanza analítica de 4 cifras.

**2.6.** 24 Frascos de vidrio refractario con capacidad para 110 ml, y envase plástico blanco de 150 cm<sup>3</sup> (nuevo).

**2.7.** Estufa de aire forzado.

**2.8.** Escobilla para laboratorio.

**2.9.** Toallas absorbentes, bata de laboratorio, guantes de nilón y tapabocas.

#### **3. Pre tratamiento del material volumétrico**

**3.1.** Previo al retiro del materia particulado de las superficies foliares se le debe realizar un pre tratamiento de lavado al materia volumétrico en el cual se depositara el material particulado (PST) retirado de las hojas obtenidas en campo.

**3.1.1.** Antes de ponerse en contacto con los materiales y equipos, el operario debe ponerse la bata, los guantes y el tapabocas.

**3.1.2.** Llenar la bomba manual con agua desionizada.

**3.1.3.** Con la bomba manual y la escobilla para laboratorio se lava con abundante agua el material volumétrico de 110 ml con su respectiva tapa.

**3.1.4.** Poner sobre las bandejas de la estufa de aire forzado cada frasco lavado.

**3.1.5.** Una vez lavados los frascos estos se deben poner en la estufa de aire forzado a una temperatura de 50°C durante 20 minutos.

**3.1.6.** Al transcurrir 20 minutos después de haber puesto los frascos al tratamiento de secado en la estufa de aire forzado, retirarlos tapanlos, y esperar hasta que alcancen temperatura ambiente.

**3.1.7.** Una vez los frascos alcancen la temperatura ambiente estos se marcaran con número de muestra del 1 al 24 (ej, NM -1o, NM-2°, etc.).

**3.1.8.** Calibrar la balanza analítica de 4 cifras serrando la cabina de la balanza. Luego de calibrada la balanza debe ponerse en gramos (mg).

**3.1.9.** Pesar cada uno de los frascos 3 veces serrando la cabina de la balanza. El peso del frasco en mg es el resultado de tres pesos y para determinar el peso en miligramos se utiliza la ecuación

1.

$$P = \frac{P1 + P2 + P3}{3} \quad (1)$$

Donde P1 es el primer peso del frasco, P2 es el peso dos del frasco, P3 es el peso tres del frasco, 3 el número de pesadas, y P es el peso asumido para el frasco. Una vez pesado cada frasco se debe tapar de manera hermética para evitar la contaminación de este.

**Nota:** Este procedimiento se debe repetir en cada cesión de laboratorio.

#### **4. Lavado de los folios**

**4.1.** Previo al lavado de las muestras foliares, en la bitácora de laboratorio se debe hacer una relación entre el número de la muestra a tratar y el número de recipiente volumétrico en el cual se depositara.

**4.1.1.** Proceda a sacar de la nevera de icopor la muestra a tratar, colóquela sobre el mesón del laboratorio. Extraiga la hoja a lavar y póngala dentro del vaso de precipitado. Con la bomba manual comience a lavar el material particulado retenido por el área foliar. Para facilitar el lavado frote suavemente el folio con el pincel de cerdas finas de ser necesario. Una vez extraído el material particulado del folio, colóquelo sobre una bandeja y proceda a lavar la siguiente hoja, repitiendo este procedimiento hasta lavar las 16 hojas. Finalmente, lave la bolsa ziplock, vertiendo su contenido en el vaso de precipitados.

**4.1.2.** Una vez retirado el material particulado de la muestra, con la ayuda del embudo de vidrio vierta el contenido dentro del recipiente volumétrico correspondiente a la muestra. Lave cuidadosamente el vaso de precipitado, el embudo y el pincel vertiendo este contenido dentro del material volumétrico.

**4.1.3.** Una vez lleno el material volumétrico tápelo cuidadosamente para evitar su contaminación.

**Nota:** Repita el anterior procedimiento desde el punto **4.1.1** al **4.1.3** hasta que sean tratadas las 24 muestras colectadas durante la semana anterior.

**4.1.4.** Una vez lavadas las 24 muestras proceda a poner en las bandejas de la estufa de aire forzado en orden ascendente de 1 hasta 24 las muestras tratadas durante el laboratorio. Retire con cuidado las tapas del material volumétrico, y sierra la estufa. Programe la estufa a una temperatura constante de 80°C durante 72 para la desecación de las muestras.

**Nota:** El material particulado retirado de las muestras que no pueda ser tratado por algún inconveniente logístico en laboratorio se debe poner en un envase plástico blanco de 150 cm<sup>3</sup> (nuevo), el cual se debe marcar con el número de la muestra y la fecha de recolección en campo, almacenándolo en un lugar del laboratorio a baja temperatura y aislado de la luz, para ser tratado con posterioridad.

**4.1.5.** Una vez transcurridas las 72 horas retire las bandejas con el material volumétrico, tape rápidamente, con cuidado, y con la tapa correspondiente cada frasco.

**4.1.6.** Limpie y calibre la balanza analítica de 4 cifras. Luego de calibrada la balanza debe ponerse en gramos (mg), cuidando de que la cabina de la balanza este cerrada.

**4.1.7.** Para determinar el peso del frasco con la muestra de material particulado seco repita el paso **3.1.9** utilizando la ecuación 1. El peso del frasco en mg será el promedio de los tres pesos, anote este valor en la bitácora de laboratorio junto al número de la muestra y la fecha de recolección de esta en campo.

**4.1.8.** Para determinar la cantidad de PST en ug utilice la ecuación dos.

$$MP = (Pf - Pi) * 1000 \quad (2)$$

Donde MP es el material particulado retenido por cada árbol muestreado expresado en (ug), Pf es el peso final del frasco en (mg) y Pi es el peso inicial del frasco en (mg), después del proceso de secado.

**Nota:** Repita los pasos **4.1.7** y **4.1.8** hasta pesar las 24 muestras. Una vez terminado este procedimiento repita el procedimiento **3** y **4**.

## **5. Determinación de área foliar**

**5.1.** Después de retirar el material particulado de los 16 folios que componen cada muestra, estas se deben depositar en su correspondiente bolsa ziplock, y se disponen para la determinación del área foliar.

**5.1.1.** Para la determinación del área foliar, primero encienda el computador, y la impresora. Verifique la conexión de la impresora HP Deskjet 3510 al computador. Realice una prueba de escáner para verificar su correcto funcionamiento.

**5.1.2.** Extraiga los 16 folios que componen cada muestra y colóquelos de manera separada sobre una bandeja metálica completamente seca y limpia.

**5.1.3.** Con una toalla absorbente extraiga la humedad restante por el envés y el haz de la hoja hasta que la hoja quede seca.

**5.1.4.** Una vez estén secos los folios colóquelos, sobre la bandeja de escáner dejando un espacio aproximado entre folio de 1,0 cm. Dependiendo del tamaño de la hoja procure agrupar un número de 8 hojas en el total del área de la bandeja de la impresora.

**5.1.5.** Después de completar el número de hojas a escanear sobre la bandeja, ponga en la parte inferior izquierda del área de escáner una escala numérica de 3,00 cm en papel milimetrado de forma vertical, consecutivamente ponga la correspondiente referencia de la muestra con el número de la muestra (ej, No588) y la fecha de la toma de esta (ej, día/mes/año). Sierre con cuidado la bandeja de impresión.

**5.1.6.** Cree en el computador una carpeta con el nombre de resultados de laboratorio, dentro de esta carpeta cree otra carpeta con el nombre de Escáner Área Foliar, ingrese en la carpeta y cree otra con el nombre del número del mes de muestreo y el nombre de este (ej., N1 Marzo), por ultimo cree una nueva carpeta con la fecha de la toma de la muestra (ej., día/mes/año).

**5.1.7.** Proceda a escanear la muestra en formato JPG, colocando la imagen dentro de la carpeta correspondiente con el día/mes/año de la toma de muestra. Verifique que la imagen escaneada se encuentre en perfecta resolución, sin que las hojas queden superpuestas, si esto sucede abra la bandeja redistribuya el área entre folios, y escanee de nuevo la imagen, eliminando la imagen imperfecta. Una vez escaneadas las muestras proceda a poner las 16 hojas dentro de su bolsa ziplock correspondiente, para hallar la materia seca o para su disposición final.

**Nota:** Para facilitar la obtención del área foliar y el PST retenido por las muestras siempre escanee los folios en el mismo orden de especie con el cual fueron recolectadas las muestras, el cual para esta investigación fue: *Callistemo citrinus*, *Tecoma stans*, *Eucalyptus ficifolia*, *Ligustrum lucidum*, *Lafoensia acuminata* y *Quercus humboldtii*. Este procedimiento se debe repetir para las 588 muestras tomadas.

## **PROCEDIMIENTO No 3**

### **DETERMINACIÓN DE MATERIA SECA**

#### **1. Objetivo**

Determinar la cantidad de materia seca foliar por individuo muestreado.

#### **2. Equipos y materiales**

**2.1.** Bandejas para horno de 10,00 x.20, 00 cm

**2.2.** Estufa de aire forzado.

**2.3.** Balanza analítica de 4 cifras.

#### **3. Obtención de la materia seca foliar**

**3.1.** Una vez escaneadas las hojas que componen las muestras colectadas para la determinación del área foliar específica AFE, se procede a la obtención de la materia seca correspondiente a cada muestra.

**3.1.1.** Saque de la bolsa ziplock los folios ya escaneados. Ponga dentro de la bandeja para horno de 10,00 x.20, 00 cm las hojas de la muestra, cuidando de que estas no queden pegadas. Ponga la referencia de número de muestra y fecha de muestreo, de papel de cartulina utilizada para determinar el área foliar.

**3.1.2.** Coloque dentro de la estufa de aire forzado las bandejas con las muestras foliares. Sierre la estufa y programe la estufa a 40°C durante 48 horas.

**3.1.3.** Una vez transcurridas las 48 horas extraiga las muestras foliares, déjelas en reposo durante 15 minutos. Coloque una bandeja desocupada y calibre la balanza analítica, graduándola en gramos. Saque cuidadosamente los folios secos e introdúzcalos dentro de la bandeja puesta sobre la balanza.

**Nota:** Si el peso se estabiliza continúe con el procedimiento, de lo contrario repita el paso **3.1.2** durante 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo repita el paso **3.1.3**.

**3.1.4.** Pese cada una de las muestras, anotando en la bitácora de laboratorio el número de la muestra, la fecha de recolección de la muestra y el contenido de materia seca en gramos de los 16 folios colectados.

**Nota:** Repita los pasos **3.1.3** y **3.1.4** para cada muestra colectada en la determinación del AFE.

## ANEXO E

Resultados de pruebas estadísticas realizadas a las variables en estudio en las dos zonas de muestreo con el software InfoStat versión 2014I.

Variable	Especies	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PSTug/cm2	Callistemo	49	396.29	262.24	350.00	13.40	0.0038
PSTug/cm2	Eucalytus	49	790.73	862.55	483.00		
PSTug/cm2	Ligustrum	49	822.90	748.38	541.00		
PSTug/cm2	Tecoma	49	625.14	454.39	488.00		

Trat.	Ranks
Callistemo	73.27 A
Eucalytus	103.77 B
Tecoma	105.63 B
Ligustrum	111.34 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura15.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la capacidad de retención de las especies muestreadas en Kennedy (Autopista sur).

Dia	Variable	Especies	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
1	Concentración	Lafoensie acuminata	49	75.69	125.42	31.00	5.09	0.0241
1	Concentración	Quercus humboldtii	49	91.35	112.02	42.00		

Trat.	Ranks
Lafoensie acuminata	43.02 A
Quercus humboldtii	55.98 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura 16.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la capacidad de retención de las especies muestreadas en Barrios Unidos (Parque El Lago).

Especie	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
callistemo	PST	Mayor precipitación	24	283.29	166.03	252.00	7.29	0.0069
callistemo	PST	Menor precipitación	25	504.76	293.43	447.00		

Trat.	Ranks
Mayor precipitación	19.38 A
Menor precipitación	30.40 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Especie	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Eucalyptus ficifolia	PST	Mayor precipitación	24	627.54	747.28	388.50	3.39	0.0658
Eucalyptus ficifolia	PST	Menor precipitación	25	947.40	949.02	584.00		

Especie	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Ligustrum lucidum	PST	Mayor precipitación	24	713.58	707.38	404.00	4.67	0.0308
Ligustrum lucidum	PST	Menor precipitación	25	927.84	785.62	651.00		

Trat.	Ranks
Mayor precipitación	20.50 A
Menor precipitación	29.32 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Especie	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Tecoma stans	PST	Mayor precipitación	24	540.67	501.96	425.00	4.88	0.0271
Tecoma stans	PST	Menor precipitación	25	706.24	396.84	693.00		

Trat.	Ranks
Mayor precipitación	20.40 A
Menor precipitación	29.42 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura 17.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la diferencia de retención de PST en las especies muestreadas en Kennedy (Autopista sur) según los periodos de muestreo húmedo y seco.

Periodo	Variable	Especie	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Menor precipitación	PST	callistemo	25	504.76	293.43	447.00	5.73	0.1256
Menor precipitación	PST	Eucalyptus ficifolia	25	947.40	949.02	584.00		
Menor precipitación	PST	Ligustrum lucidum	25	927.84	785.62	651.00		
Menor precipitación	PST	Tecoma stans	25	706.24	396.84	693.00		

**Figura 18.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la diferencia de retención de PST en las especies muestreadas en Kennedy (Autopista sur) en el periodo de muestreo seco.

Especies	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Lafoensia acuminata	PST	Mayor precipitación	24	49.33	71.46	25.00	1.25	0.2625
Lafoensia acuminata	PST	Menor precipitación	25	101.00	158.75	46.00		

Especies	Variable	Periodo	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Quercus humboldtii	PST	Mayor precipitación	24	70.04	88.02	39.00	0.72	0.3952
Quercus humboldtii	PST	Menor precipitación	25	111.80	129.55	55.00		

**Figura 19.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la diferencia de retención de PST por especie muestreada en Barrios Unidos (Parque El Lago) según los periodos de muestreo húmedo y seco.

Periodo	Variable	Especies	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Mayor precipitación	PST	Lafoensia acuminata	24	49.33	71.46	25.00	5.82	0.0158
Mayor precipitación	PST	Quercus humboldtii	24	70.04	88.02	39.00		

Trat.	Ranks
Lafoensia acuminata	19.63 A
Quercus humboldtii	29.38 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

Periodo	Variable	Especies	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Menor precipitación	PST	Lafoensia acuminata	25	101.00	158.75	46.00	1.33	0.2481
Menor precipitación	PST	Quercus humboldtii	25	111.80	129.55	55.00		

**Figura 20.** Resultados de la prueba de Kruskal Wallis de la diferencia de retención de PST en las especies muestreadas en Barrios Unidos (Parque El Lago) según los periodos de muestreo húmedo y seco.

Variable	Especie	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
PST ug	Callistemo citrinus	32	925.00	444.04	821.50	80.08	<0.0001
PST ug	Eucalyptus ficifolia	27	26063.37	30631.45	15771.00		
PST ug	Ligustrum lucidium	29	38688.59	31392.13	18087.00		
PST ug	Tecoma stans	27	7977.56	3747.33	7394.00		

Trat.	Ranks
Callistemo citrinus	16.66 A
Tecoma stans	57.85 B
Eucalyptus ficifolia	74.26 B C
Ligustrum lucidium	88.62 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura 21.** Resultados de prueba de Kruskal Wallis del área foliar promedio de las especies muestreadas en Kennedy.

Variable	Especie	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
Área foliar	Lafoensia acuminata	30	19.44	6.42	18.39	10.40	0.0013
Área foliar	Quercus humboldtti	31	30.22	12.78	30.89		

Trat.	Ranks
Lafoensia acuminata	23.55 A
Quercus humboldtti	38.21 B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura 22.** Resultados de prueba de Kruskal Wallis del área foliar promedio de las especies muestreadas en Barrios Unidos.

N-M	Variable	Especies	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
1	Rel-LMF- AMF	Callistemon citrinus	64	11.65	1.88	11.30	283.42	<0.0001
1	Rel-LMF- AMF	Eucalyptus ficifolia	64	3.09	0.69	3.00		
1	Rel-LMF- AMF	Lafoencie Acuminata	64	2.45	0.37	2.50		
1	Rel-LMF- AMF	Ligustrum lucidum	64	2.10	0.27	2.10		
1	Rel-LMF- AMF	Quercus humbolditti	64	3.28	0.46	3.20		
1	Rel-LMF- AMF	Tecoma stans	64	2.33	0.34	2.30		

Trat.	Ranks
Ligustrum lucidum	69.29 A
Tecoma stans	113.55 B
Lafoencie Acuminata	141.57 B
Eucalyptus ficifolia	221.48 C
Quercus humbolditti	256.62 C
Callistemon citrinus	352.50 D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0.05$ )

**Figura 23.** Prueba de Kruskal Wallis de los datos de la relación largo ancho de las especies muestreadas en Kennedy y Barrios Unidos.

**Tabla 1.**

Resultados de correlación de Spearman de PST de especies vegetales muestreadas en el área de las concentraciones de fondo.

Especies	Coeficientes de asociación de Spearman (r)						
	Nombre	Día(r)	Sig	Semana (r)	Sig	Mes (r)	Sig
<i>Quercus humboldtii</i>		-0,23	0,106	-0,14	0,507	-0,77	0,068
<i>Lafoensia acuminata</i>		0,30	0,246	0,18	0,395	0,37	0,466

Nota. Sig = Valores de significancia estadística.

**Tabla 2.**

Distancia promedio de las especies vegetales a la estación Simón Bolívar

Distancia	Especies	Zona norte	Zona Centro	Zona sur
Distancia promedio de los árboles muestreados a la estación Simón Bolívar	<i>Lafoensia acuminata</i>	360	0,0*	416
	<i>Quercus humboldtii</i>	344	340	0,0*

Nota.\* = La especie no presenta árboles en el área de ubicación muestreada.

**Tala 3**

Coeficientes de Correlación promedio día por especie, según su distancia a la estación Carvajal Sony Kennedy.

Zona de muestreo	Especies	Coeficiente de correlación relación de Spearman (r)			
Kennedy	Nombre Especie	Zona verde	Anden Norte	Separador	Anden sur
		<i>Callistemo citrinus</i>	-0,10	0,00	0,08
	<i>Tecoma Stans</i>	-0,05	0,0	-0,23	0,00
	<i>Eucalyptus ficifolia</i>	0,00	-0,15	0,00	0,31
	<i>Ligustrum lucidium</i>	0,00	-0,09	-0,005	0,19

**Tabla 4.**

*Coefficientes de Correlación promedio semana por especie, según su distancia a la estación Carvajal Sony Kennedy.*

Zona de muestreo	Especies	Coefficientes de correlación de Spearman (r)			
		Zona Verde	Anden norte	Separador	Anden sur
<b>Kennedy</b>	Nombre				
	<i>Callistemo citrinus</i>	-0,08	0,00	-0,02	0,00
	<i>Tecoma stans</i>	-0,10	0,00	-0,14	0,00
	<i>Ligustrum lucidium</i>	0,00	-0,07	0,00	-0,52
	<i>Eucalyptus ficifolia</i>	0,00	0,88*	0,28	-0,31

*Nota.\*= El dato no es tenido en cuenta debido a que las semanas en las que fueron muestreados arboles sobre el andén costado norte solo fueron 7 de 24 equivalentes al 29% de las semanas muestreadas.*

**Tabla 6.**

*Coefficiente de Correlación promedio día para cada especie según la distancia a la estación Carvajal Kennedy*

Zona de muestreo	Especies	Coefficientes de correlación de Spearman (r)			
		Zona Verde	Anden norte	Separador	Anden sur
<b>Kennedy</b>	Nombre				
	<i>Callistemo citrinus</i>	0,29	0,00	-0,01	0,00
	<i>Tecoma stans</i>	-0,88	0,00	-0,51	0,00
	<i>Ligustrum lucidium</i>	0,00	-0,61	0,00	-0,80
	<i>Eucalyptus ficifolia</i>	0,00	-0,27	0,30	0,38

*Nota.\*= El dato no es tenido en cuenta debido a que los días en los que fueron muestreados arboles en la zona centro fueron 28 de 49 equivalentes al 57% de los días de muestreo.*

**Tabla 5.**

*Coefficiente de Correlación promedio mes para cada especie según la distancia a la estación Simón Bolívar*

Zona de muestreo	Especies	Coefficiente de correlación de Spearman (r)		
		Zona Norte	Zona Centro	Zona sur
<b>Barrios unidos</b>	Nombre Especie			
	<i>Lafoensia acuminata</i>	-0,18	0,0	-0,13
	<i>Quercus humboldtii</i>	-0,00	-0,12	0,0

**Tabla 7.**

*Coefficientes de Correlación promedio semana por especie, según su distancia a la estación Simón Bolívar*

Zona de muestreo	Especies	Coeficiente de correlación de Spearman (r)		
		Zona Norte	Zona Centro	Zona sur
Barrios unidos	Nombre Especie			
	<i>Lafoensia acuminata</i>	-0,29	0,00	-0,22
	<i>Quercus humboldtii</i>	0,00	-0,21	0,0

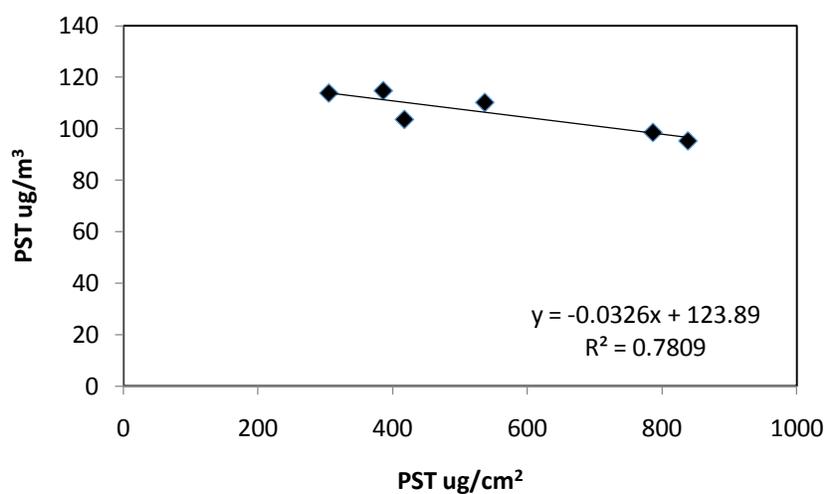
Nota.\*= El dato no es tenido en cuenta debido a que las semanas en las que fueron muestreados arboles en la zona centro solo fueron 8 de 24 equivalentes al 31% de las semanas muestreadas

**Tabla 8.**

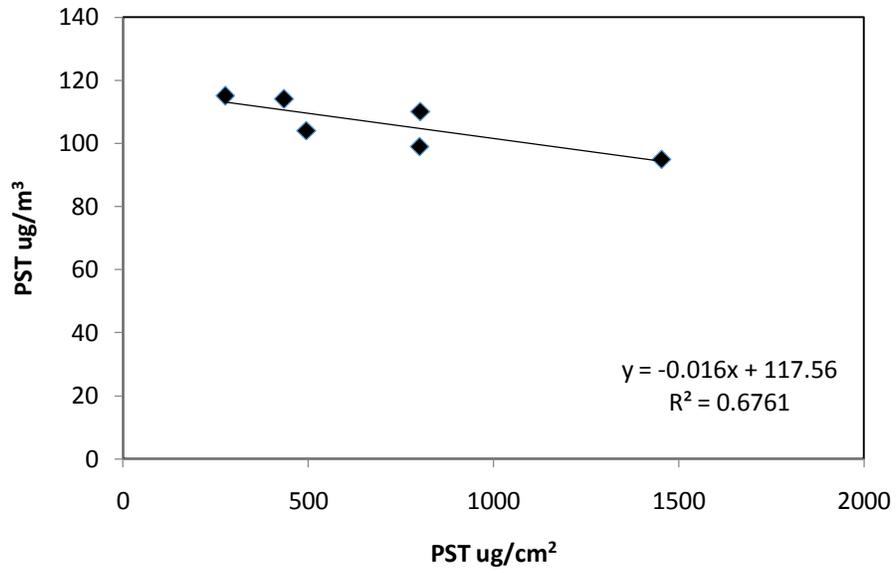
Coeficiente de Correlación promedio mes para cada especie según la distancia a la estación Simón Bolívar

Zona de muestreo	Especies	Coeficiente de correlación de Spearman (r)		
		Zona Norte	Zona Centro	Zona sur
Barrios unidos	Nombre Especie			
	<i>Lafoensia acuminata</i>	-0,56	0,00	-0,50
	<i>Quercus humboldtii</i>	-0,66	-0,81	0,00

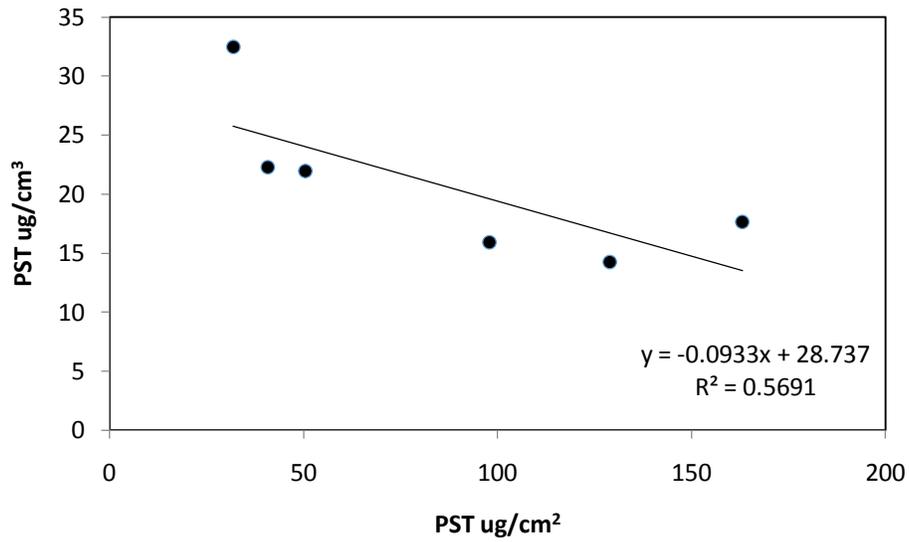
Nota.\*= El dato no es tenido en cuenta debido a que los meses en los que fueron muestreados arboles en la zona centro no correspondió a los 6 meses de muestreo



**Figura33.** Modelo de regresión lineal concentraciones promedio mes de *Tecoma stans* zona verde y PST promedio móvil mes estación Carvajal Sony Kennedy



**Figura 35.** Modelo de regresión lineal concentraciones promedio mes de *Ligustrum lucidum* anden costado sur y PST promedio móvil mes estación Carvajal Sony Kennedy



**Figura 40.** Modelo de regresión lineal concentraciones promedio mes *Quercus humboldtii* y PST promedio móvil mes estación Simón Bolívar Barrios unidos.

**Tabla 9.**  
Medidas de discriminación análisis correspondencial

Medidas de discriminación			
	Dimensión		Media
	1	2	
PST	0,930	0,877	0,903
Forma	0,977	0,972	0,974
Superficie	0,967	0,972	0,970
Total activo	2,875	2,820	2,847
% de la varianza	95,817	94,000	94,909

Fuente: Autor.