

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO
(PM10) DE SEIS ESPECIES DEL ARBOLADO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ
(COLOMBIA)**

**ADRIANA LUCÍA PALACIOS AYALA
JUAN DIEGO ECHEVERRY MORENO**

**UNIVERSIDAD ECCI
Facultad de Ingeniería
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2024**

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO
(PM10) DE SEIS ESPECIES DEL ARBOLADO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ
(COLOMBIA)**

Trabajo de grado para optar al título de

INGENIERA/O AMBIENTAL

**ADRIANA LUCÍA PALACIOS AYALA
JUAN DIEGO ECHEVERRY MORENO**

Directores:

JAIME ALBERTO NAVARRO LÓPEZ

Ingeniero Forestal

BERYINY RUÍZ CAÑÓN

Ingeniera Química

**UNIVERSIDAD ECCI
Facultad de Ingeniería
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.**

2024

Tabla de contenido

1. Título de la investigación.....	5
2. Resumen.....	5
2.1. Abstract.....	6
3. Introducción	6
4. Objetivos de la investigación.....	8
4.1. Objetivo general	8
4.2. Objetivos específicos.....	8
5. Materiales y métodos	8
5.1. Selección de las áreas de estudio.....	8
5.2. Selección de las especies.....	9
5.3. Toma de muestras foliares	11
5.4. Procesamiento de muestras	11
5.5. Cálculo del área foliar	12
5.6. Procesamiento y análisis de información	13
6. Resultados.....	14
7. Discusión.....	15
8. Conclusiones.....	18
9. Agradecimientos	19
10. Referencias	19

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación de especies en la estación Carvajal-Sevillana.	10
Figura 2. Ubicación de especies en la estación Centro de Alto de Rendimiento.	10
Figura 3. Resultados posteriores a la filtración de una muestra de Chicalá tomada en la estación Carvajal – Sevillana.	12
Figura 4. Escaneo de una muestra de la especie caucho (Ficus americana).	13
Figura 5. Comparación de la captura de PM10 por las especies en las dos estaciones.	14
Figura 6. Comparación del depósito de PM10 en las dos áreas de estudio.	15

1. Título de la investigación

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE RETENCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM10) DE SEIS ESPECIES DEL ARBOLADO URBANO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ (COLOMBIA)

2. Resumen

En la ciudad de Bogotá, el registro de las concentraciones de los contaminantes criterio realizado por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), ha permitido conocer que históricamente el contaminante con mayor índice de excedencias en los niveles máximos permisibles establecidos por la Resolución 2254 de 2017, corresponde al material particulado de 10 micras (PM10). La presente investigación consistió en evaluar la eficiencia de captura de PM10 de seis especies arbóreas, tanto nativas como introducidas, con el fin de priorizar la siembra de especies en el arbolado de la ciudad que contribuyan eficazmente a la mitigación de la contaminación atmosférica. Inicialmente se seleccionaron las áreas de estudio, teniendo en cuenta las estaciones que presentaron mayor y menor nivel de contaminación en la década de 2013 - 2022, las cuales fueron Carvajal - Sevillana (localidad de Kennedy) y Centro de Alto Rendimiento (localidad de Engativá), donde se trazó un radio de 500 metros alrededor de cada estación. Luego se eligieron las especies e individuos a muestrear mediante el Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá (SIGAU) y visitas de campo para verificar la abundancia de las especies e individuos en las zonas. Para estimar la cantidad de partículas retenidas en las muestras foliares seleccionadas, se implementó el método de lavado de hojas para el retiro del material particulado, posteriormente se desarrollaron procesos de filtrado y por último se implementó un análisis gravimétrico. Se encontraron diferencias significativas entre las especies y sitios de muestreo, donde en la estación Carvajal - Sevillana la especie con mayor efectividad en la captura de PM10 es el Ligustro y, en la estación Centro de Alto Rendimiento es el Holly. Estos resultados permiten establecer recomendaciones para la selección de especies que aporten al mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad.

Palabras clave. Arbolado urbano, ecología urbana, infraestructura verde, material particulado, PM10.

2.1. Abstract

In the city of Bogotá, the record of the concentrations of criterion pollutants carried out by the Bogotá Air Quality Monitoring Network (RMCAB), has made it possible to know that historically the pollutant with the highest rate of exceedances in the maximum permissible levels established by Resolution 2254 of 2017 corresponds to particulate matter of 10 microns (PM10). The present research consisted of evaluating the PM10 capture efficiency of six tree species, both native and introduced, in order to prioritize the planting of species in the city's trees that effectively contribute to the mitigation of air pollution. Initially, the study areas were selected, taking into account the stations that presented the highest and lowest level of contamination in the decade 2013 - 2022, which were Carvajal – Sevillana (locality of Kennedy) and Centro de Alto Rendimiento (locality of Engativá), where a radius of 500 meters was drawn around each station. Then the species and individuals to be sampled were chosen through the Information System for the Management of Urban Trees of Bogotá (SIGAU) and field visits to verify the abundance of the species and individuals in the areas. To estimate the amount of particles retained in the selected leaf samples, the leaf washing method was implemented to remove the particulate material, subsequently filtering processes were developed and finally a gravimetric analysis was implemented. Significant differences were found between the species and sampling sites, where at the Carvajal - Sevillana station the species with the greatest effectiveness in capturing PM10 is the Ligustro and, at the Centro de Alto Rendimiento station it is the Holly. These results allow us to establish recommendations for the selection of species that contribute to the improvement of the city's air quality.

Keywords. *Urban forest, urban ecology, green infrastructure, particulate matter, PM10.*

3. Introducción

El material particulado (PM) es un contaminante criterio, que afecta la calidad del aire, produciendo daños a nivel ambiental y en la salud de la población que vive o trabaja en lugares donde se superan las concentraciones máximas permisibles, el tamaño de las partículas está directamente relacionado con su capacidad de generar afectaciones a la salud y el medio ambiente, las fracciones que tienen una magnitud inferior a 2.5 µm pueden llegar a los pulmones e incluso al torrente sanguíneo (EPA, 2018). También ocasionan muerte prematura en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, asma,

función pulmonar reducida, etc. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire causa alrededor de 6.7 millones de muertes cada año en el mundo (OMS, 2022). Por otro lado, a nivel ambiental se generan cambios en la estructura física y química del componente abiótico (agua, suelo y aire) y el componente biótico (seres vivos), alterando el equilibrio eco sistémico (EPA, 2018); también genera afectaciones a nivel ecosistémico, ya que estas micropartículas son perjudiciales para la vegetación, reducen la función estomática y afectan el proceso de la fotosíntesis, pues sus efectos nocivos son más dañinos en los periodos secos (Appleton & Kocí, 2000).

Estas partículas son una mezcla de moléculas sólidas y líquidas que tienen tamaños desde los 0.005 a 500 μm (Smith & Staskawlcz, 1977). Tienen orígenes orgánicos e inorgánicos, y se clasifican dependiendo el diámetro de cada una de ellas, donde se definen entre gruesas (con tamaño mayor o igual (\geq) a 10 μm), finas (menores o iguales a (\leq) 2.5 μm) y ultrafinas (menores o iguales (\leq) a 0.1 μm) (Gao et al., 2015). Además, se refiere que las partículas con diámetros (\leq) a 10 μm son de origen antropogénico, mientras las (\geq) a 10 μm son de origen natural en su gran mayoría (Maraziotis et al., 2008).

En la ciudad de Bogotá se han generado afectaciones a la comunidad en general a causa del material particulado, este problema ha aumentado con el paso del tiempo. Algunas actividades como la industrialización, la expansión urbana, el incremento del parque automotor, el crecimiento demográfico y el estado de la malla vial son los factores que contribuyen a que esta problemática continúe, es por eso que se ha hecho un enfoque en investigaciones que permitan conocer la importancia de las especies arbóreas de la ciudad y el papel que estas puedan cumplir como medidas de mitigación de la contaminación del aire de las ciudades (Nowak et al., 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, en este estudio se evaluó a las especies *Cotoneaster pannosus* (holly), *Ficus americana* (caucho), *Lafoensia acuminata* (guayacán), *Ligustrum lucidum* (ligustro), *Sambucus nigra* (sauco) y *Tecoma stans* (chicalá), representativas del arbolado de Bogotá y ubicadas en dos sitios contrastantes por su calidad de aire (Centro de Alto Rendimiento y Carvajal – Sevillana), lo anterior, con el objetivo de determinar la capacidad de retención de material particulado que posee cada una de ellas a través de sus hojas.

4. Objetivos de la investigación

4.1. Objetivo general

Evaluar la efectividad de retención de material particulado PM10 en el área foliar de seis especies arbóreas encontradas en zona de influencia de dos estaciones de monitoreo atmosférico de Bogotá con niveles contrastantes de contaminación.

4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar la masa de PM10 retenida en el área foliar de las especies muestreadas en zona de influencia de las estaciones Carvajal – Sevillana y Centro de Alto Rendimiento.
- Determinar mediante análisis estadístico las especies que presentan mayor efectividad en el depósito de PM10 dentro de cada área de estudio.
- Identificar las características morfológicas de las hojas que permiten a las especies tener una mayor capacidad de retención de PM10 en las dos áreas de estudio.

5. Materiales y métodos

5.1. Selección de las áreas de estudio

Para el presente estudio, se tomó como fuente de información las estaciones que forman parte de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB), donde se compilaron los datos promedio anuales de material particulado de 10 micras (PM10) durante la década de 2013 - 2022. A partir de la comparación de los valores de dicho contaminante a través del promedio de la década para cada estación, se seleccionaron las dos que se consideraron más relevantes (mayor y menor concentración), con el fin de que el estudio fuera contrastante. La primera estación fue Carvajal - Sevillana, al ser la que presentaba los mayores niveles de contaminación respecto a las demás, debido a que se encuentra en la Autopista Sur, la cual es un importante corredor vial de la ciudad y que cuenta con bastante flujo vehicular, de igual manera el sector está rodeado de una zona industrial. La segunda estación fue Centro de Alto Rendimiento, por presentar los niveles más bajos de contaminación y por su cercanía al parque Simón Bolívar que hace parte de la estructura ecológica principal del distrito capital y es conocido como uno de los principales pulmones de Bogotá. Posterior a la selección de las estaciones,

se trazó un radio de 500 metros a su alrededor con la ayuda de Google Earth Pro y de esta manera se definieron las áreas de muestreo de las especies arbóreas (figuras 1 y 2).

5.2. Selección de las especies

Por medio del Sistema de Información para la Gestión del Arbolado Urbano de Bogotá (SIGAU), se extrajo información sobre las especies más abundantes en el arbolado de la ciudad. Ya habiendo definido las áreas de estudio, se realizaron visitas de campo para verificar la existencia y abundancia de las especies en estas zonas, donde se seleccionaron seis, teniendo en cuenta que fueran nativas e introducidas. Las especies nativas fueron: *Ficus americana* (caucho), *Lafoensia acuminata* (guayacán) y *Tecoma stans* (chicalá), las introducidas fueron *Cotoneaster pannosus* (holly), *Ligustrum lucidum* (ligustro) y *Sambucus nigra* (sauco).

Cabe resaltar que para el caso de la estación Centro de Alto Rendimiento, el acceso al área donde se ubica dicha estación se encontraba limitado en gran parte del radio de 500 metros a la redonda, por lo cual se optó por tomar como punto de referencia la Biblioteca Virgilio Barco para seleccionar las especies más cercanas a su alrededor, ya que se encontraban relativamente contiguas al radio trazado mediante Google Earth Pro (figura 2).

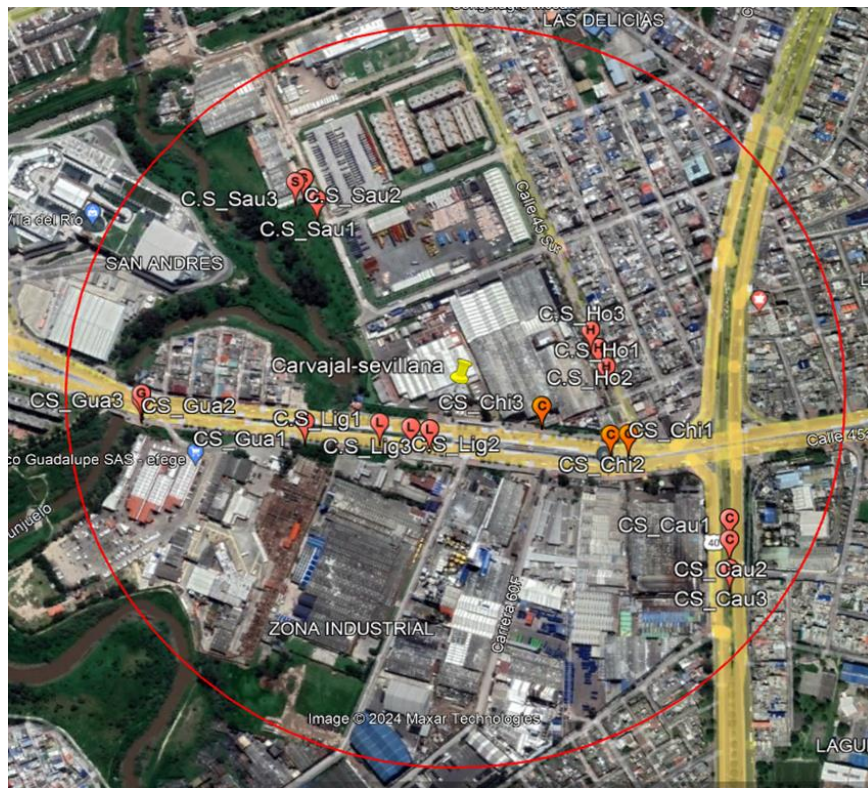


Figura 1. Ubicación de especies en la estación Carvajal-Sevillana.

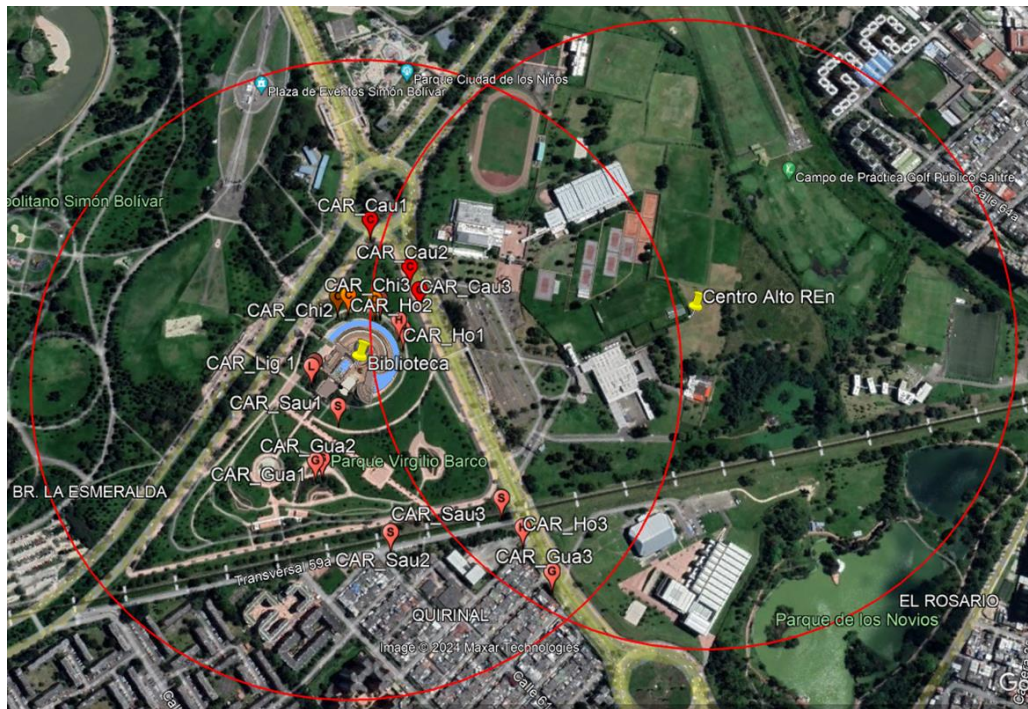


Figura 2. Ubicación de especies en la estación Centro de Alto de Rendimiento.

5.3. Toma de muestras foliares

Dentro de cada área de estudio se seleccionaron tres individuos de cada especie para la toma de muestras foliares, teniendo en cuenta que fueran árboles con tamaño significativo. La recolección de muestras para cada individuo se realizó a una altura entre 1,5 y 2,5 metros, según lo descrito por Chen et al. (2017) y fue de tres ramas de aproximadamente 10 hojas, teniendo especial atención en que no presentaran alteraciones generadas por insectos y que estuvieran aparentemente sanas. Para el corte se utilizaron tijeras de podar, donde las muestras se depositaron en bolsas de plástico herméticamente cerradas, debidamente rotuladas y se almacenaron en una nevera portátil con hielo seco, permitiendo la conservación durante el trayecto hasta el laboratorio de procesamiento.

5.4. Procesamiento de muestras

Una vez en laboratorio, adaptando la metodología aplicada por Dzieranowski et al. (2011) y Chen et al. (2017), las muestras de cada bolsa se sacaban cuidadosamente y se elegían las mejores hojas, tratando de cubrir un área de entre 300 - 500 cm², lo cual equivalía aproximadamente a 10 o 20 hojas; esta cantidad de hojas podía variar según el tamaño foliar, dependiendo de la especie y del individuo del cual se tomó la muestra. Dichas hojas se manipularon con pinzas cuidadosamente, para evitar perder el material particulado adherido y se introdujeron en frascos de vidrio de boca ancha con un volumen de 500 ml, donde se les añadió 100 ml de agua destilada para realizar un lavado agitando el frasco durante un minuto. Posterior a esto, con otros 50 ml de agua destilada adicionales, se sacaron las hojas una por una para realizar un último lavado y también para lavar el frasco de vidrio, de tal manera que no quedara material particulado en las paredes y fondo del frasco.

A partir de los 150 ml de agua que se obtenía del lavado de las hojas, se realizó una filtración inicial con un filtro de malla en acero inoxidable de 109 micras, esto con el fin de eliminar las impurezas de tamaño más grande como restos de animales o suciedad. Posteriormente, se realizó una segunda filtración (figura 3) con la ayuda de una bomba de vacío, utilizando papel de filtro cualitativo de celulosa, marca Stonylab para retención de partículas de 10 micras, el cual se manipuló dentro de un embudo de cerámica. Cabe resaltar que los filtros utilizados se dejaron secar durante 24 horas en un

recipiente cerrado con gel de sílice y se pesaron antes de realizar las filtraciones, con el fin de lograr estabilidad y brindar mayor confiabilidad a los resultados.

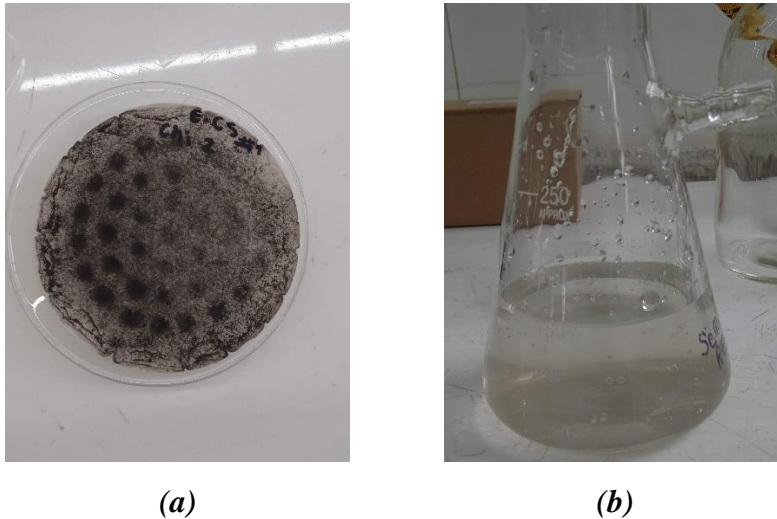


Figura 3. Resultados posteriores a la filtración de una muestra de Chicalá tomada en la estación Carvajal – Sevillana. (a) Filtro de celulosa con PM10 retenido por la muestra de Chicalá; (b) Agua resultante de la filtración de la muestra de Chicalá.

Una vez filtrados los 150 ml de agua, el filtro se puso a secar durante 24 horas en horno a 75 °C, y se pesó nuevamente para calcular mediante diferencia de masa la cantidad de material particulado de 10 micras retenida en el filtro. Este mismo procedimiento se realizó para la totalidad de las muestras foliares de los individuos arbóreos de cada especie en las dos áreas de estudio.

5.5. Cálculo del área foliar

Para calcular el área de la superficie foliar de las muestras procesadas en el laboratorio se utilizó el software Image J de acuerdo a lo descrito por Aponte (2017), donde previamente cada una de las hojas fueron escaneadas (figura 4), se seleccionaron los individuos de cada punto y especie, se analizaron y calcularon en dicho software, el cual, por medio de un contraste de grises y la demarcación del objeto a analizar, realizaba el cálculo del área en cm². De esta manera se analizaron todas las muestras y los datos fueron consignados en tablas por punto de muestreo, especie arbórea y número de muestra.



Figura 4. Escaneo de una muestra de la especie caucho (Ficus americana).

5.6. Procesamiento y análisis de información

Al culminar el procesamiento en laboratorio de las tres muestras de cada una de las seis especies para las dos estaciones estudiadas, se procedió a organizar los valores obtenidos antes y después de realizar las filtraciones. Para procesar dicha información, se realizó una resta del peso en gramos del filtro con material particulado menos el peso del filtro limpio, como lo estableció Chen et al. (2017). De esta manera se obtuvo una diferencia de masa que indicó la cantidad de material particulado de 10 micras retenido en cada una de las muestras, la cual se convirtió a unidades de microgramos.

Así mismo, con el cálculo del área foliar de cada una de las muestras en unidades de cm^2 se realizó una división que permitiera obtener el valor de PM_{10} en unidades de $\mu\text{g}/\text{cm}^2$. Una vez teniendo esta base de datos organizada, se procedió a hacer uso del programa R Studio para realizar los respectivos análisis estadísticos. Para comparar los sitios y las especies se empleó una prueba de Kruskal-Wallis inicialmente, y posteriormente la prueba de Dunne para establecer las especies que presentaran diferencias significativas en cuanto a la retención de PM_{10} . También se emplearon diagramas de cajas y bigotes para visualizar las diferencias.

6. Resultados

Los datos sobre la cantidad de material particulado acumulado en las hojas de las seis especies arbóreas estudiadas en las dos estaciones de monitoreo se presentan en la figura 5. Todas las especies analizadas capturaron partículas en su área foliar, pero la cantidad de PM10 difirió significativamente entre las especies y los sitios de muestreo. De acuerdo a la prueba estadística de Kruskal-Wallis, la estación Centro de Alto Rendimiento arrojó un valor $P=0.02148$ y la estación Carvajal – Sevillana un valor $P=0.01847$, dichos valores indican, tal como se observa en la figura 5, que se encontraron diferencias significativas en el depósito de PM10 que presentó cada una de las especies en los dos sitios evaluados.

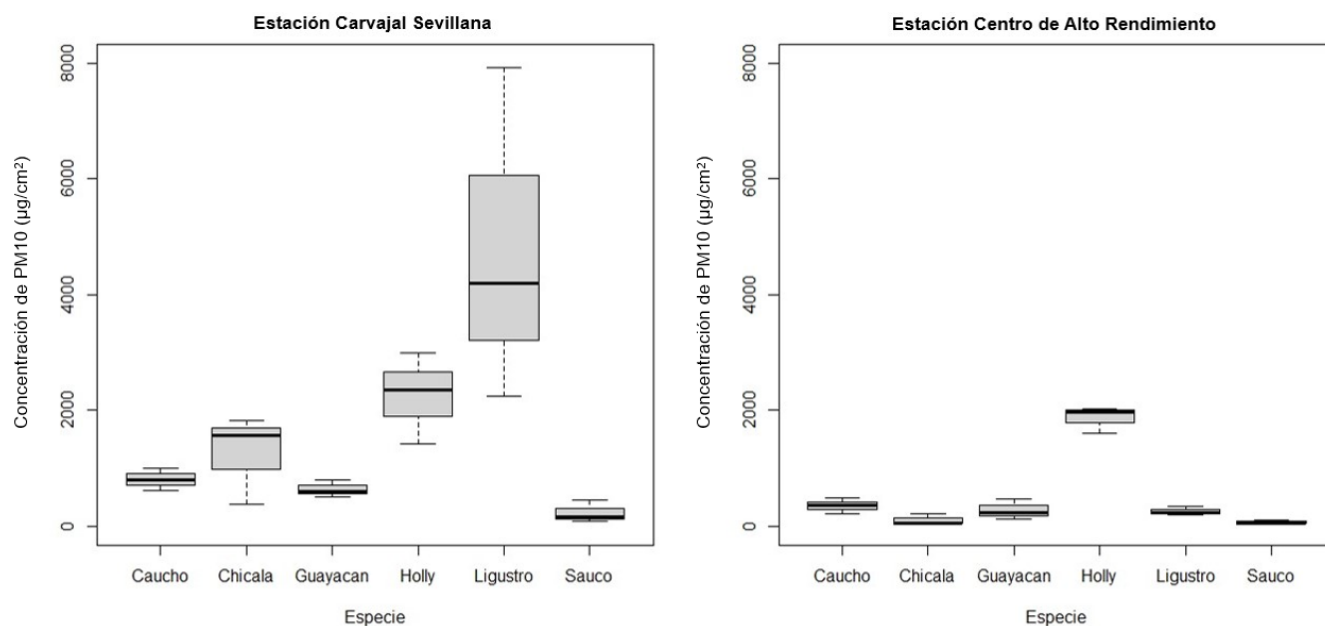


Figura 5. Comparación de la captura de PM10 por las especies en las dos estaciones.

En la estación Carvajal – Sevillana, la especie Ligustro (*Ligustrum lucidum*), conformada por árboles de 4 a 8 metros de altura (Sánchez, 2016), que se caracterizan por tener hojas grandes y lisas, presentó mayor eficiencia en el depósito de PM10. De igual manera, se observó que las especies Holly y Chicalá poseen una capacidad de retención de PM10 mayor respecto a las especies Caucho, Guayacán y Sauco. Con la aplicación de la prueba estadística de Dunne, se encontró que la especie Holly es diferente a Sauco y Chicalá; así mismo Sauco es distinta a Holly y Caucho.

En cuanto a la estación Centro de Alto Rendimiento, fue la especie Holly (*Cotoneaster pannosus*) la que presentó mayor eficiencia en la captura de PM10, esta se compone por árboles de 3 a 4 metros de altura clasificados como arbustos (InBUy, 2011), que presentan hojas pequeñas con tricomas (vellosidades). Según la prueba de Dunne, se observó que la especie Ligustro es diferente a Sauco y Guayacán; como también Holly es distinta a Sauco.

Por otro lado, es importante resaltar que la concentración de material particulado varía de gran manera en las dos estaciones evaluadas (figura 6), esto coincide con la información base que fue descrita con anterioridad, donde se mencionó que alrededor de la estación Centro de Alto Rendimiento hay una influencia muy baja de vehículos, por lo cual los árboles no tienen una gran cantidad de material particulado depositado, sino en su mayoría el que es transportado por el viento y la lluvia. En contraste, la estación Carvajal – Sevillana, se encuentra ubicada en medio de una autopista con constante flujo vehicular e industrias que generan emisiones, por lo tanto, la cantidad de PM10 en dicha área de estudio es casi el doble en comparación con la estación Centro de Alto Rendimiento.

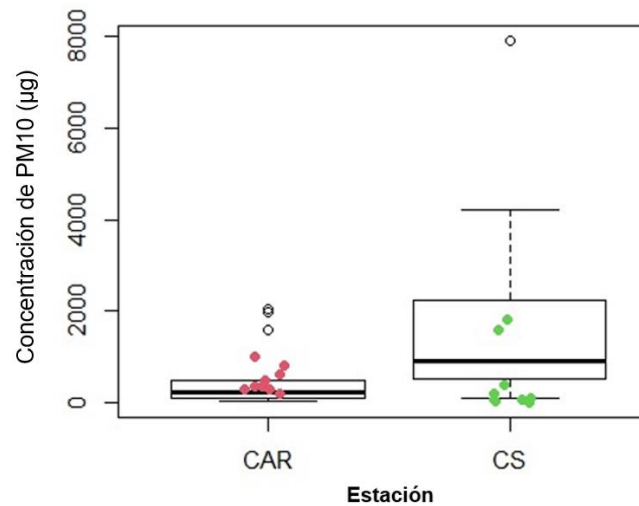


Figura 6. Comparación del depósito de PM10 en las dos áreas de estudio.

7. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de las pruebas estadísticas realizadas, revelan diferencias significativas en la capacidad de retención entre las especies evaluadas y, además, evidencian una relación importante entre la concentración de contaminantes en la estación Carvajal – Sevillana, caracterizada por niveles elevados de contaminación atmosférica, debido a que este sector es un

importante corredor vial de la ciudad de Bogotá, por donde a diario transita una gran cantidad de vehículos que ingresan y salen de la capital de país, sumado a que es una pequeña zona industrial con fuentes fijas de emisiones, convirtiendo este espacio en uno de los más contaminados de la ciudad de Bogotá. En contraste, la estación Centro de Alto Rendimiento presenta una contaminación en niveles de casi la mitad respecto a Carvajal – Sevillana por estar en una zona de baja circulación vehicular y que está conformada por zonas verdes, donde no se genera gran cantidad de emisiones atmosféricas.

En la estación Carvajal – Sevillana, se destaca la especie Ligustro como la de mayor depósito de material particulado (PM10), se cree que las particularidades de cada especie analizada pueden generar diferencias en la capacidad de retener PM10, este hallazgo concuerda con la afirmación de Beckett et al. (1998), quienes indicaron que la fisiología y microestructura de ciertas especies de árboles son apropiadas para interceptar y capturar partículas contaminantes. En el caso del Ligustro, según Fernández et al., (2020) este posee hojas sin pelo opuestas entre sí, con forma ovalada a elíptica, de 4 a 13 cm de largo y de 3 a 6 cm de ancho, dichas características las convierten en hojas de gran tamaño que posibilitan una mayor capacidad de retención de PM10. Un estudio de Oliva & Valdés (2004) realizado en ciudades mediterráneas indicó que la especie *Ligustrum lucidum* puede ser útil para eliminar contaminantes de polvo en ambientes urbanos debido a su capacidad para crecer en ambientes contaminados. Además, en la investigación de Wang et al. (2015) encontraron que la mayor cantidad de material particulado se encontró en el follaje de las plantas de Ligustro cultivadas en el sitio más contaminado y señalaron que las hojas acumulaban más material particulado en un sitio muy contaminado que en sitios de muestreo menos contaminados.

Otras especies como el Holly y Chicalá, también se identificaron con una capacidad de depósito superior a las demás, aunque en menor medida que el Ligustro. Sin embargo, también pueden considerarse como opciones viables para plantaciones urbanas destinadas a crear barreras capaces de reducir los niveles de contaminación. En contraste, las especies Caucho, Guayacán y Sauco son las que presentaron las tasas más bajas de depósito de material particulado (PM10) en la estación Carvajal – Sevillana, lo que indica que su contribución a la reducción de PM10 podría ser limitada.

Al comparar los resultados que arrojaron las estaciones de monitoreo, en el Centro de Alto Rendimiento, donde los niveles de contaminación se encuentran muy por debajo respecto a la estación Carvajal – Sevillana, es posible observar que en esta zona la especie con mayor depósito de material particulado (PM10) es Holly, la cual puede contribuir a la mejora de la calidad del aire, no solo en ambientes con niveles bajos de contaminación, sino también en lugares más contaminados, tal como se pudo observar anteriormente; pues después del Ligustro, la especie Holly es la que presentó mayor efectividad en el depósito de material particulado.

En cuanto a los rasgos foliares de Holly, de acuerdo a lo descrito por Starr et al., (2003) esta especie posee hojas simples con forma elíptica, de 1,5 a 3 cm de largo y de 0,8 a 1,6 cm de ancho, las cuales se caracterizan por ser lisas en el haz y tomentosas (con pelos) blanquecinas en el envés. De lo anterior es posible determinar que, aunque la especie presenta hojas de tamaño reducido, estas tienen mayor capacidad para retener material particulado en su pequeña área foliar (en comparación a las demás especies estudiadas) gracias a los pelos que posee en sus hojas, los cuales le posibilitan acumular humedad y también micropartículas. Respecto a esta afirmación, no se han encontrado estudios que indaguen sobre el papel que puede desempeñar la especie Holly (*Cotoneaster pannosus*) en el mejoramiento de la calidad del aire en entornos contaminados, pues los usos de esta especie se han enfocado principalmente a los ámbitos de ornamentación y medicina.

Las condiciones micro ambientales juegan un papel crucial como generadoras de variación individual y tienen un impacto directo en los rasgos foliares, incluyendo las características de los estomas (Wali et al., 2007). El número de estomas en una hoja está determinado por factores genéticos específicos de la especie, así como por la disponibilidad de agua y la intensidad lumínica a la que la hoja está expuesta. Además, se observa comúnmente una relación entre el tamaño de la hoja y la densidad de estomas, ya que las hojas más grandes ofrecen una mayor superficie para la incidencia de la luz (Lallana et al., 2004). Sin embargo, los resultados de la presente investigación pueden refutar lo encontrado por estos autores en cuanto a la relación entre el tamaño de la hoja y la densidad estomática, puesto que la especie Holly es la que presenta las hojas con menor tamaño respecto a las demás evaluadas y aun así posee mayor capacidad de retención de material particulado que las otras especies. La densidad estomática de las especies Ligustro y Holly puede provocar un aumento en su transpiración, esto puede

llevar a que la tasa de deposición de PM sea mayor tal como sugiere Burkhardt et al., (2001) que ocurre en otras especies. La pérdida de agua a través de los estomas (transpiración) puede contribuir al enfriamiento de las superficies foliares, lo que, a su vez, puede favorecer la deposición de material particulado mediante el proceso de termoforesis (Räsänen et al., 2013).

Los resultados observados podrían desempeñar un papel crucial de especies como Ligustro y Holly en la mitigación de la contaminación en entornos urbanos altamente afectados, como lo mencionan Kane & Kirwan, (2009), en cuanto a los servicios ecosistémicos que pueden prestar los árboles en las ciudades. Este estudio subraya la importancia de seleccionar cuidadosamente las especies arbóreas para la plantación en áreas urbanas, considerando su capacidad específica para depositar contaminantes atmosféricos, como el PM10, para así contribuir a purificar el ambiente en los sectores más contaminados. Estos resultados son una fuente de información importante para la toma de decisiones en políticas urbanas y proyectos de forestación, con el objetivo de crear entornos más saludables y sostenibles en la ciudad de Bogotá.

7. Conclusiones

- Las especies con mayor capacidad de retención de material particulado PM10 son Ligustro (*Ligustrum lucidum*) y Holly (*Cotoneaster pannosus*), las cuales mostraron un mejor desempeño a la hora de contener PM10, debido a las características que tienen sus hojas, como tamaño y morfología, dichas propiedades las vuelven especies con capacidades especiales para mejorar la calidad del aire en las zonas más contaminadas de la ciudad de Bogotá.
- Para estudios futuros se sugiere tener en cuenta tiempos de muestras más amplios que permitan tener en cuenta las diversas variables climáticas que se puedan presentar, por ejemplo, precipitaciones que causan lavados ocasionales de las especies a muestrear y presentan una menor cantidad de material particulado depositado en la superficie foliar, esto permitirá tener una mayor precisión y eliminar datos atípicos que se puedan presentar.
- El ligustro - *Ligustrum lucidium*, es una especie importante a tener en cuenta a la hora de la toma de decisiones o la planificación urbana de un territorio, ya que se pueden crear barreras naturales que permitan mitigar los impactos que pueda generar la industria y el parque automotor, como algunas de las fuentes principales de emisión de material particulado.

- Es posible que las especies con una menor capacidad de retención de material particulado, son las mismas que tienen una mayor capacidad de soportar niveles de contaminación mayores, debido a las características morfológicas de sus hojas.

8. Agradecimientos

Queremos agradecer primeramente a Dios por habernos permitido llegar a este punto, a un paso de culminar un gran proceso en cada una de nuestras vidas y uno de nuestros sueños. A nuestras familias y amigos, quienes nos brindaron apoyo incondicional y motivación a lo largo de este desafiante proceso. Expresar nuestro sincero agradecimiento a los docentes Jaime Navarro y Beryiny Ruiz, por su guía, apoyo constante y valiosos aportes a lo largo de este proceso de investigación. Su experiencia y dedicación fueron fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo. También agradecemos a la universidad ECCI por proporcionarnos los recursos y el respaldo necesarios para llevar a cabo esta investigación. Finalmente, agradecemos a todas las personas que de una manera u otra contribuyeron a la culminación de este proyecto. Cada uno de ustedes ha dejado una huella significativa en este viaje académico. Gracias a todos quienes formaron parte de este camino, su apoyo ha sido invaluable.

9. Referencias

1. Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos – EPA. (2018). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
2. Aponte, C. (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.)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería.
3. Appleton, B., & Koci, J. (2000). *Trees for Problems Landscape Cities*. Virginia Tech Extension. Publication 430-022.
4. Beckett, K. P., Freer-Smith, P. H., & Taylor, G. (1998). *Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution*. *Environmental Pollution*, 99(3)

5. Burkhardt, J., Koch, K., & Kaiser, H. (2001). *Deliquescence of deposited atmospheric particles on leaf surfaces*. *Water, Air and Soil Pollution: Focus*, 1, 313-321.
6. Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). *Variation in Tree Species Ability to Capture and Retain Airborne Fine Particulate Matter (PM_{2.5})*. *Scientific reports*, 7(1), 3206.
7. Dzierzanowski, K., Popek, R., Gawrońska, H., Saebø, A., & Gawroński, S. W. (2011). *Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species*. *International journal of phytoremediation*, 13(10), 1037–1046.
8. Fernandez, R. D., Ceballos, S. J., Aragón, R., Malizia, A., Montti, L., Whitworth-Hulse, J. I., Castro-Díez, P., & Grau, H. R. (2020). *A global review of Ligustrum lucidum (OLEACEAE) invasion*. *The Botanical Review; Interpreting Botanical Progress*, 86(2), 93–118.
9. Gao, G., Sun, F., Thao, N. T. T., Lun, X., & Yu, X. (2015). *Different Concentrations of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and PM₁ of Several Urban Forest Types in Different Seasons*. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(6).
10. InBUy – Base de datos de Invasiones Biológicas para Uruguay. (2011). *Cotoneaster pannosus*. http://inbuy.fcien.edu.uy/fichas_de_especies/DATAonline/DBASEonline/Cotoneaster_pannosus_w.pdf
11. Kane, B., & Kirwan, J. L. (2009). *Value, Benefit, and Costs of Urban Trees*. Virginia Cooperative Extension. Publication 420-181.
12. Lallana, V. & Lallana, M. 2004. *Densidad estomática en hojas de Eryngium horridum MALME y su relación con el estado de desarrollo de las hojas*. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*. UNR, 5: 81–86.

13. Maraziotis, E., Sarotis, L., Marazioti, C., & Marazioti, P. (2008). *Statistical analysis of inhalable (PM10) and fine particles (PM2.5) concentrations in urban region of Patras, Greece*. *Global nest journal*, 10(2), 123-131.

14. Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). *Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States*. *Urban forestry & urban greening*, 4(3-4), 115-123.

15. Oliva, S. R., & Valdés, B. (2004). *Ligustrum lucidum Ait. f. Leaves as a Bioindicator of the Air-Quality in a Mediterranean City*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 96(1–3), 221–232.

16. Organización Mundial de la Salud - OMS. (2022). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

17. Räsänen, J. V., Holopainen, T., Joutsensaari, J., Ndam, C., Pasanen, P., Rinnan, Å., & Kivimäenpää, M. (2013). *Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees*. *Environmental pollution*, 183, 64-70.

18. Sánchez, J. (2016). *Ligustrum lucidum*. *Árboles Ornamentales*. <https://www.arbolesornamentales.es/Ligustrum%20lucidum.pdf>

19. Smith, W. H., & Staskawicz, B. J. (1977). *Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: Some preliminary observations and assessment of research needs*. *Environmental management*, 1, 317-330.

20. Starr, F., Starr, K., & Loope, L. (2003). *Cotoneaster pannosus*. United States Geological Survey – Biological Resources Division. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=9c0b8b35a6c2f66f73764be4c136ab1da9e9537d>

21. Wali, B., Iqbal, M., & Mahmooduzzafar. (2007). *Anatomical and functional responses of Calendula officinalis L. to SO₂ stress as observed at different stages of plant development.* *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 202(4).

22. Wang, H., Shi, H., & Wang, Y. (2015). *Effects of weather, time, and pollution level on the amount of particulate matter deposited on leaves of Ligustrum lucidum.* The Scientific World Journal, 2015, 1–8.