

Material particulado en hojas de árboles en parques urbanos del Municipio de Cercado, Cochabamba-Bolivia

Particulate matter on tree leaves in urban parks in Cercado, Cochabamba, Bolivia

Edgar E. Gareca León¹, Mirtha Judith Rivero Lujan², Magaly Mercado Ustariz³

Correo de correspondencia: edgareca.l@fcyt.umss.edu.bo

Resumen

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas urbanos para la salud humana y el medio ambiente debido a que el material particulado menor a 10 y 2,5 μm (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, respectivamente), incluye alérgenos, metales pesados e hidrocarburos que pueden llegar a los pulmones, causando problemas de salud, especialmente en niños y ancianos. Este MP se remueve del aire al depositarse en las hojas de los árboles. En el presente trabajo se determinó la cantidad del PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ depositado en hojas de los árboles más abundantes de siete parques y plazas urbanas del Cercado de Cochabamba-Bolivia, basándose en características morfológicas de las hojas y zonas de la ciudad. En total, se analizó el MP en 66 hojas de árboles, correspondientes a seis especies, distribuidas en siete parques o plazas de tres zonas de la provincia Cercado de Cochabamba. Se realizaron análisis de varianza para comparar las características de las hojas, zonas y parques estudiados. Los resultados mostraron una alta variabilidad en la retención del PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ para cada especie dentro de los parques estudiados. La producción de resinas en la superficie de las hojas estuvo asociada con la retención del PM_{10} en *Ficus benjamina* y *Schinus areira*. No se observó ninguna relación entre el indumento de las hojas y el $\text{PM}_{2.5}$ de las seis especies arbóreas. El presente trabajo sirve para incidir en políticas públicas de plantaciones del arbolado urbano, recomendando especies arbóreas para remover el MP de áreas urbanas como Cochabamba.

Palabras clave: arbolado urbano, captura de material particulado, contaminación del aire, indumento de las hojas, procesos de regulación natural, servicios ecosistémicos.

Abstract

Air pollution is one of the main urban problems worldwide for human health and the environment. Particulate matter smaller than 10 and 2.5 μm (PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$, respectively) includes allergens, heavy metals, and hydrocarbons that can reach the lungs, causing health problems, especially in children and the elderly. This PM is removed from the air when it settles on tree leaves. In this study, the amount of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ deposited on the leaves of the most abundant trees in seven urban parks and squares in Cercado de Cochabamba-Bolivia was determined, taking into account the morphological characteristics of the leaves and the areas of the city where these parks and squares are located. In total, PM was quantified in 66 trees, corresponding to six species, distributed in seven parks or squares in three areas of the province of Cercado de Cochabamba, Bolivia. Analysis of variance was performed to compare the characteristics of the leaves, areas, and parks studied. The results showed high variability in the retention of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ for each species within the parks studied. The indumentum and resin production of the leaves was associated with PM_{10} retention in *Ficus benjamina* and *Schinus areira*. No relationship was observed between the characteristics studied and $\text{PM}_{2.5}$ for the six tree species. This study serves to influence public planting policies, recommending tree species for the removal of PM in urban areas as Cochabamba.

Keywords: urban trees, particulate matter capture, air pollution, leaf indumentum, natural regulation processes, ecosystem services.

1. Introducción

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas urbanos a nivel mundial para la salud humana y el medio ambiente debido a la presencia de elementos nocivos en concentraciones elevadas en el aire. Se estima que el material particulado presente en la atmósfera (MP) es el responsable de aproximadamente 3,2 millones de muertes al año, tanto en áreas urbanas como rurales, lo que equivale a más del 5% de todas las muertes globales (Li et al., 2017; Lim et al. 2012).

¹ Centro de Biodiversidad y Genética, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0001-6230-0381>

² Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0000-8458-2164>

³ Centro de Biodiversidad y Genética, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0007-1192-1031>

Las partículas suspendidas o MP, se pueden presentar de diferentes formas, como humo, polvo, cenizas, hollín, polen, aerosoles, compuestos principalmente por sulfatos, nitratos, amoníaco, cloruro sódico, carbón, polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. El respirar el aire con estas partículas representa una amenaza para la salud humana porque, dependiendo de su tamaño (entre más pequeñas, mayor riesgo), pueden afectar los pulmones y al sistema respiratorio en general, siendo más vulnerables las personas con enfermedades cardíacas y pulmonares (OMS, 2021; Wang et al., 2021). Una de las estrategias eficaces para mejorar la calidad del aire en áreas urbanas contaminadas es la reforestación. De hecho, se ha encontrado que la calidad del aire, evaluado como contaminación por MP, es mejor en áreas con abundantes árboles, como bosques urbanos, parques y cinturones verdes, en comparación a áreas con menos árboles (Weber et al., 2014; Xing et al., 2019). Para lo cual es importante cuantificar el MP retenido en las hojas de los árboles de una ciudad. Las principales fuentes de contaminación del aire en una ciudad son las emisiones de las fábricas, minas, refinerías y del parque automotor. Estas actividades emiten óxidos de nitrógeno (NOx), sulfuros de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COV) y MP, que incluye a las partículas suspendidas totales (PST) y al material particulado menor a 10 μm y 2,5 μm (MP_{2,5} y MP₁₀, respectivamente (Awasthi et al., 2024; Li et al., 2024). Todos estos compuestos favorecen al smog (Ventura et al. 2020).

La contaminación atmosférica causada principalmente por el transporte es la primera actividad de contaminación a nivel de Bolivia; esta incluye a la combustión producida por automóviles, camiones y motocicletas (INE, 2012). Solo en el Departamento de Cochabamba el año 2010 se tenían 201.850 vehículos, incrementándose el año 2024 a 542.000 unidades, lo que representó un crecimiento de 169% en 14 años (<https://www.ine.gob.bo>). Según datos del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2012), con base en el Registro Único para la Administración Tributaria Municipal (RUAT), este aumento del parque automotor contribuyó a las emisiones elevando los niveles de partículas finas, ozono y dióxido de nitrógeno (NO₂).

Las fábricas de ladrillos, tejas y otros productos en Cochabamba-Bolivia son la segunda actividad, después del parque automotor. Estas fábricas contaminan el aire por los combustibles que se utilizan para la cocción de estos productos a cielo abierto (leña y otros) que generan humo y polvo, afectando la calidad del aire (Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, 2021).

Respecto a la agricultura en Bolivia, el uso indiscriminado de plaguicidas en tierras agrícolas y su uso urbano provocan contaminación por volatilización y dispersión de estos compuestos, por transportarse incluso por varios kilómetros debido a los vientos (Rivero et al. 2019; 2024). Estos tóxicos se pueden adherir a partículas de polvo, provocando la contaminación del aire.

Los incendios forestales son otra fuente que causa la contaminación del aire en Bolivia y también en Cochabamba. Al respecto, Peña y Castro (2024) mencionan que el año 2024, el país tuvo los mayores incendios forestales alcanzando las áreas quemadas a 10.771.550 hectáreas que implican emisión de grandes cantidades de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NOx), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), plomo, mercurio. Asimismo, una de las tres amenazas del Parque Nacional Tunari (PNT), son los incendios provocados por causas antrópicas como quemas agrícolas y negligencia humana (fogatas mal apagadas y quema de basura), solo el año 2022 los incendios arrasaron con 300 ha del PNT (Gareca y Aguirre, 2023).

El material particulado (MP), objeto del presente estudio, concierne a partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas, que por su pequeño tamaño se encuentran suspendidas en el aire, clasificándose en dos tamaños: MP₁₀ que son partículas iguales o menores a 10 μm (MP grueso) y MP_{2,5} que son partículas de 2,5 μm o menos, MP fino). El presente estudio comparó la cantidad de MP depositado en hojas de los árboles en parques y plazas urbanas del cercado de Cochabamba. Se determinó el MP₁₀ y MP_{2,5} depositado en hojas de los árboles más frecuentes de estos parques y plazas. Además, se consideró la morfología de las hojas y el indumento de su superficie.

Para el análisis de resultados se comparó la cantidad de MP acumulado en: 1) la superficie de las hojas entre las especies arbóreas más frecuentes en la ciudad, 2) hojas con diferentes formas y tipos de indumento en la superficie, y 3) entre diferentes zonas de la ciudad. Esta última comparación nos permitió conocer en qué lugar de la ciudad se recibió más este beneficio de la naturaleza al hombre. Con los resultados se aportan elementos que se consideran de utilidad, como las especies que remueven mayor cantidad de MP y pueden mejorar la calidad del aire del municipio de Cercado de Cochabamba, para ser utilizada por las autoridades pertinentes como la Unidad Forestal, Departamento de Gestión de Recursos Naturales, Dirección de Medio Ambiente, Secretaría Municipal de Planificación y Medio Ambiente, Gobierno Municipal Autónomo de Cochabamba.

2. Materiales y métodos

El área de estudio se encuentra en la zona urbana de Cochabamba, en el Municipio de Cercado, a una altitud promedio de 2.500 m s. n. m. Presenta una superficie de 55,63 km² y forma parte de la subregión del valle central junto con los municipios de Sacaba, Quillacollo, Colcapirhua, Tiquipaya, Vinto y Sipe Sipe (Figura 1). El relieve se caracteriza por terrazas, valles, piedemonte y serranías, considerándose tres grandes paisajes fisiográficos: una fracción de la parte sur del Parque Nacional Tunari, el propio Valle Central y la Serranía de San Pedro, en la parte este.

El clima en Cochabamba para la temporada de lluvias abarca de noviembre a marzo, con temperaturas máximas diarias que oscilan entre 25-27 °C. La temporada seca de invierno comprende los meses de junio a agosto con temperaturas entre 1-3 °C en la noche (Weather Atlas, 2025). De acuerdo con este atlas, la temporada de lluvia dura casi 6 meses, de fines de octubre a mediados de abril. El mes con más lluvia en Cochabamba es enero, con un promedio de 78 mm. Los meses más ventosos se presentan de agosto a diciembre, con velocidades promedio del viento de más de 11,4 kilómetros por hora.

Colecta del material vegetal

Se colectaron hojas de seis especies de árboles frecuentes en 7 parques y plazas del municipio de Cercado, Cochabamba (17°23' S, 66°09' O) de marzo a septiembre de 2023, correspondientes a un total de 66 muestras. Los parques y plazas se encontraron en cuatro zonas de la ciudad: norte (parque Lincoln), oeste (parque Coña Coña), centro (plaza Quintanilla, Colón, Cobija y Corazonistas) y sur (parque Kanata) (Figura 1).

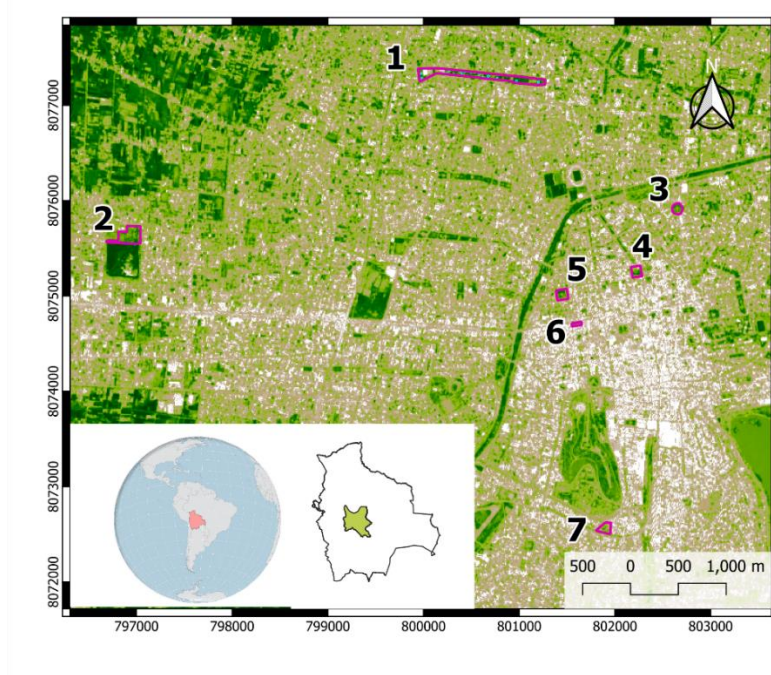
La velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa determinan la concentración y distribución de los contaminantes en diferentes zonas, afectando la calidad del aire de las ciudades (Jiang et al., 2024). En este sentido, se colectaron las muestras considerándose ausencia de lluvias de al menos 5 días antes del muestreo, velocidad de viento menor a 5 ms⁻¹, al momento de cortar las hojas de las diferentes especies de árboles en las zonas de estudio. Para lo cual se utilizó un datalogger portable (Mini Thermo-Anemometer), Extech Instruments, Nashua NH, USA), en un espacio abierto próximo a la zona de muestreo antes, durante y después de la recolección de las hojas. Esta medición fue importante ya que vientos superiores a 5 ms⁻¹ afectan a la cantidad de material particulado presente en las hojas (Ould-Dada y Baghini, 2001).

Las especies de estudio fueron *Jacaranda mimosifolia* D. Don, *Schinus areira* L., *Ficus benjamina* L., *Populus alba* L., *Bauhinia variegata* L., *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC) Mattos (Missouri Botanical Garden, s.f., Tabla 1). La colecta de las hojas se realizó cuidadosamente con una tijera podadora introduciendo las mismas en una bolsa plástica de 13x25 cm, debidamente etiquetada con sus respectivos códigos, fecha, especie, punto de muestreo y número de individuos que se mantendrán a lo largo del desarrollo de toda la técnica. Se recortaron ramas pequeñas

(máx. 15 cm de largo) de los cuatro puntos cardinales de cada árbol a una altura entre 1,5 m y 2,5 m (Chen et al. 2017). Las bolsas etiquetadas se conservaron a -20 °C hasta la extracción del material particulado.

Figura 1

Parques y plazas de Cochabamba, Bolivia, de las que se obtuvo el material vegetal de los árboles



Nota. 1) parque Lincoln, 2) parque Coña Coña, 3) plaza Quintanilla, 4) plaza Colón, 5) plaza Cobija, 6) plaza Corazonistas y 7) parque Kanata. Mapa base índice diferencial normalizado de la vegetación (NDVI) proyección PSAD56/UTM Zona 19.

Extracción del material particulado

La extracción del material particulado en las hojas se basó en la metodología de Chen et al. (2017), modificada y estandarizada en la Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos y el Centro de Biodiversidad y Genética (UMSS). Para lo cual se descongelaron las muestras, y se pesaron 15 g de hojas en una balanza digital de sensibilidad 0,001g. Seguidamente, en un vaso de precipitación, se lavaron las hojas con agua destilada y un pincel plano (número 6) en un volumen de 80 mL de agua destilada, evitando romper las hojas. Posteriormente, se guardaron las hojas procesadas en la bolsa, se vació el contenido del vaso de precipitación a una probeta y se enrasó a un volumen de 100 mL, esta se denominó Muestra 1 (M1). Finalmente, se filtraron las soluciones utilizando un cernidor de metal de 150 µm para obtener la muestra inicial de líquido en la que se cuantificará el MP.

Estimación de las fracciones de material particulado en la muestra I

El 20% de la M1, correspondiente a 20 mL, se transfirió a un papel estañado previamente pesado (P1) en una balanza (marca SPAN con sensibilidad de 0.0001 g) y se secó en una estufa, hasta peso constante. Una vez seco el papel estañado con la muestra se lo volvió a pesar (P2); la diferencia entre P2 y P1 correspondió al peso de 20% de Todo el Material Suspendido (TMS). Con este peso se calculó el peso total (g) del material suspendido en la muestra de líquido original (PTMS), dividiendo el peso de TMS por 0,2.

Tabla 1

Parques y plazas donde se colectó el material vegetal de árboles frecuentes y se cuantificó el material particulado presente en la superficie de sus hojas. Los puntos de muestreo seleccionados se representan en la Figura 1

Parques y plazas	Nombre de especie	Nombre común	Código	Cantidad
Parque Lincoln (PL)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	1JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	1SCMO	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	1FIBE	3
plaza Cobija (PC)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	2JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	2SCMO	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	2FIBE	3
plaza Quintanilla (PQ)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	3JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	3SCMO	3
	<i>Populus alba</i> L. (Salicaceae)	Álamo	1POAL	3
Parque Coña Coña (PCC)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	4JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	4SCMO	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	4FIBE	3
	<i>Populus alba</i> L. (Salicaceae)	Álamo	2POAL	3
Plaza Colon (PCL)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	5JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	5SCMO	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	5FIBE	3
	<i>Bauhinia variegata</i> L. (Fabaceae)	Pata de buey	5BAVA	3
Plaza Corazonistas (PCO)	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart.	Tajibo	6HAIM	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	6FIBE	3
parque Kanata (PK)	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Jacaranda	7JAMI	3
	<i>Schinus areira</i> L. (Anacardiaceae)	Molle	7SCMO	3
	<i>Ficus benjamina</i> L. (Moraceae)	Ficus	7FIBE	3
Total, de muestras				66

El 80% remanente de la M1, se filtró en papeles con porosidad de 11 μm de diámetro y posteriormente esta solución se filtró utilizando un papel filtro de porosidad 2,5 μm de diámetro (papeles filtro Starlab Scientific, BIO-1 y BIO-42, respectivamente). De esta manera se retuvieron las partículas con un diámetro entre 11 μm y 100 μm (MP_{11-100}) y entre 2,5 μm y 11 μm ($\text{MP}_{2,5-11}$).

Asimismo, se pesó el papel filtro antes (PA) y después de cada filtrado (PD) mencionado anteriormente. El PD se obtuvo siguiendo el procedimiento de secado del papel filtro que fue remojado con agua destilada durante 24 horas y secado en estufa a 70 °C hasta peso constante. El peso del material particulado se obtuvo de la diferencia PD menos PA para cada porosidad de papel filtro. Como el peso resultante del material particulado, PMP_{11-100} y $\text{PMP}_{2,5-11}$, correspondió al 80% de la M1, se dividió por 0,8 para obtener la cantidad de material particulado suspendido en la muestra inicial. Finalmente, el peso del material particulado menor a 2,5 μm ($\text{PMP}_{2,5}$) se obtuvo de la diferencia entre PTMS y la suma de PM_{11-100} (peso entre 11 y 100 μm) y $\text{PM}_{2,5-11}$. Se convirtió la cantidad de material particulado a una unidad de μg . Asimismo, se estimó el área (mm^2) de la que se estimaron los pesos del MP, estimándose así el $\text{MP}_{2,5}$ y MP_{11} en $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Se realizaron tres análisis de varianza con modelos lineales mixtos, en todos se usó a las zonas como factor aleatorio. Los modelos fueron: 1) tipo de hoja (simples vs. compuestas) como factor fijo, 2) efecto de plazas y parques, especies y su interacción como factores fijos, y 3) especies como factor fijo y plaza anidado en zona. Estos análisis se realizaron para $MP_{2,5}$ y $MP_{2,5-11}$ por separado. Se eliminaron cuatro observaciones por presentar valores extremos, y ambas variables se transformaron aplicando logaritmo natural para satisfacer los supuestos de distribución normal y homocedasticidad. Los análisis se realizaron en el software SAS OnDemand for Academics v9.04 (SAS Institute, Cary, North Carolina, USA).

3. Resultados

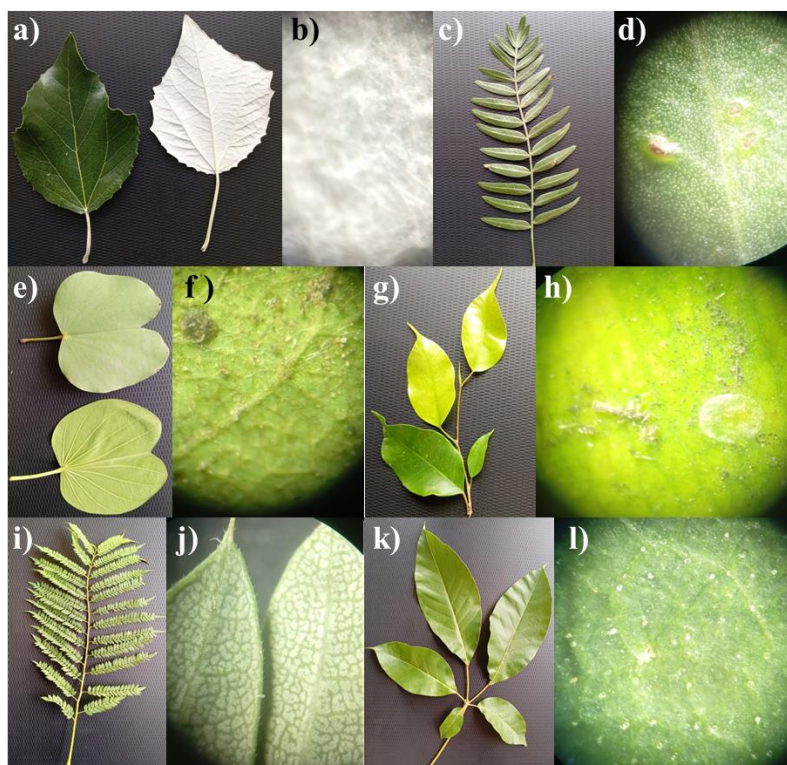
En total se cuantificó el material particulado depositado en 66 muestras obtenidas de 22 árboles, correspondientes a seis especies, distribuidos en siete parques o plazas de cuatro zonas de la provincia Cercado de Cochabamba (Tabla 1, Figura 1).

Caracterización morfológica de las hojas de los árboles estudiados

A continuación, se presenta una descripción breve de las características de las hojas de las especies consideradas, que incluye la forma, tamaño, indumento y exudados presentes en las hojas.

Figura 2

Hojas de las especies estudiadas y detalles de sus láminas



Nota. a) *Populus alba* haz y envés, con b) detalle de su envés lanoso. c) *Schinus areira* con d) detalle de su envés glanduloso. e) *Bauhinia variegata* haz y envés con f) detalle del haz con glándulas. g) *Ficus benjamina* con h) detalle de ninfas de *Singhiella simplex* (mosca blanca). i) *Jacaranda mimosifolia* con j) detalle del envés de sus folíolos con pelos cortos y arqueados en su borde. k) *Handroanthus impetiginosus* con l) detalle de su haz con escamas dispersas.

***Populus alba* (Álamo blanco)**

Árbol caducifolio exótico, sus hojas son simples, generalmente de 4 a 15 cm de largo, alternas y con forma palmada, incluyen 3 a 5 lóbulos y bordes dentados. Tienen un haz de color verde oscuro brillante y glabro (sin indumento) y un envés cubierto de una densa capa de pelos blanquecinos lanosos, que les da su nombre "álamo blanco" o "plateado" (Figuras 2a y 2b).

***Bauhinia variegata* (Pata de buey)**

Árbol caducifolio a semi caducifolio exótico. Las hojas tienen de 10-20 cm de largo y ancho, redondeadas, y bilobuladas en la base y el ápice. El indumento del envés de la hoja de esta especie, está recubierto por pelos estrigosos esparcidos (pelos cortos y tiesos). La superficie superior de la hoja (haz) tiene una especie de glándulas esparcidas con un exudado de resina, el cual se esparce a manera de hilos transparentes (Figuras 2e y 2f).

***Jacaranda mimosifolia* (Jacarandá)**

Árbol caducifolio a semi caducifolio nativo que pierde sus hojas en la estación fría (invierno). Las hojas de *Jacaranda mimosifolia* son compuestas, bipinnadas y de aspecto similar a un helecho, con folíolos pequeños y verdes. Cada hoja puede medir hasta 50 cm de largo y se divide dos veces, con pequeños folíolos que a menudo tienen un ápice puntiagudo. La superficie inferior (envés) y la superficie superior (haz) no tienen indumento (son glabros); sin embargo, se observan pelos cortos y algo arqueados en el borde de los folíolos (Figuras 2i y 2j)

***Schinus areira* (Molle)**

Se caracteriza por ser un árbol siempre verde nativo. Sus hojas son compuestas, alternas, péndulas e imparipinnadas, glabras (sin pelos) en ambas caras con 7 a 16 pares de folíolos (hojitas) lineares a lanceolados, margen ligeramente dentado y venación conspicua, las hojas miden entre 15 y 25 cm de largo. La superficie inferior de sus hojas (envés), se encuentra cubierta por glándulas secretoras de aceite por lo que desprenden una fuerte fragancia similar a la pimienta. En el borde de los folíolos se observan pelos cortos. (Figuras 2c y 2d).

***Ficus benjamina* (Ficus)**

Árbol siempre verde exótico. El aspecto normal de las hojas del *Ficus benjamina* es liso y brillante sin ningún tipo de indumento en ambas caras (Figura 2g). Sin embargo, la superficie inferior de su hoja (envés) es atacada por la mosca blanca (*Singhiella simplex*), del cual se alimenta provocando amarillamiento y caída de las hojas, y retraso en su crecimiento.

Cuando las hojas del *Ficus benjamina* son atacadas por la mosca blanca y la cochinilla, se hacen pegajosas y tienen una melaza (Figura 2h). Estos insectos segregan esta melaza y hacen que las hojas queden pegajosas, atrayendo hormigas y favoreciendo el desarrollo del hongo de la negrilla, que cubre las hojas y limita la fotosíntesis de estos árboles.

***Handroanthus impetiginosus* (Tajibo rosado)**

Árbol caducifolio (pierde su follaje en un periodo específico del año), nativo. Sus hojas son palmaticompuestas, generalmente con cinco folíolos de forma elíptica u ovada, con el borde aserrado en el extremo y la base cuneada. Son de color verde oscuro y se presentan opuestas al tallo, con el haz glabro y el envés salpicado de escamas y pequeños pelos en las axilas de las venas secundarias. Haz con escamas dispersas en la lámina y nervio principal, a veces con algunos tricomas simples aislados. Envés con escamas semidensas, raro con algunos tricomas simples sobre el nervio principal y proximidades del mismo, a veces se observan pequeños domacios con tricomas simples (Figuras 2k y 2l).

Las diferencias entre tipos de indumentos se determinaron en la comparación entre especies, ya que cada especie presentó un diferente tipo de indumento. Específicamente, *P. alba* (envés lanoso), *B. variegata* (estrigoso), *J. mimosifolia* (glabro solo borde de foliolos con pelos), *S. areira* (envés con glándulas oleíferas), *Ficus benjamina* (envés con melaza producida por interacción con la mosca blanca) y *H. impetiginosus* (envés con escamas y algunos tricomas). Las comparaciones de la adsorción de MP₁₀ y MP_{2,5} según los tipos de hojas (compuestas vs. simples) resultaron en diferencias no significativas ($P = 0,87$ y $P = 0,99$, respectivamente, Tabla 2). Asimismo, las comparaciones entre tipos de indumento, equivalente a la comparación entre especies, resultaron en diferencias no significativas ($P = 0,95$ y $P = 0,84$, respectivamente, Tabla 3)

Tabla 2

Análisis de varianza para la comparación de MP₁₀ y MP_{2,5} entre tipos de hoja (simple vs. compuesta)

MP	Efecto	GL num.*	GL den.†	Valor F	P > F
MP ₁₀	Tipo de hoja	1	57,1	0,03	0,87
MP _{2,5}	Tipo de hoja	1	59,3	0,01	0,98

* grados de libertad del numerador, † grados de libertad del denominador

Tabla 3

Análisis de varianza para la comparación de MP₁₀ y MP_{2,5} entre tipos de indumento presente en las hojas de seis especies estudiadas

MP	Efecto	GL num.*	GL den.†	Valor F	P > F
MP ₁₀	Indumento	5	53,5	0,22	0,95
MP _{2,5}	Indumento	5	55,6	0,41	0,84

* grados de libertad del numerador, † grados de libertad del denominador

Comparación de MP₁₀ y MP_{2,5} entre plazas y parques

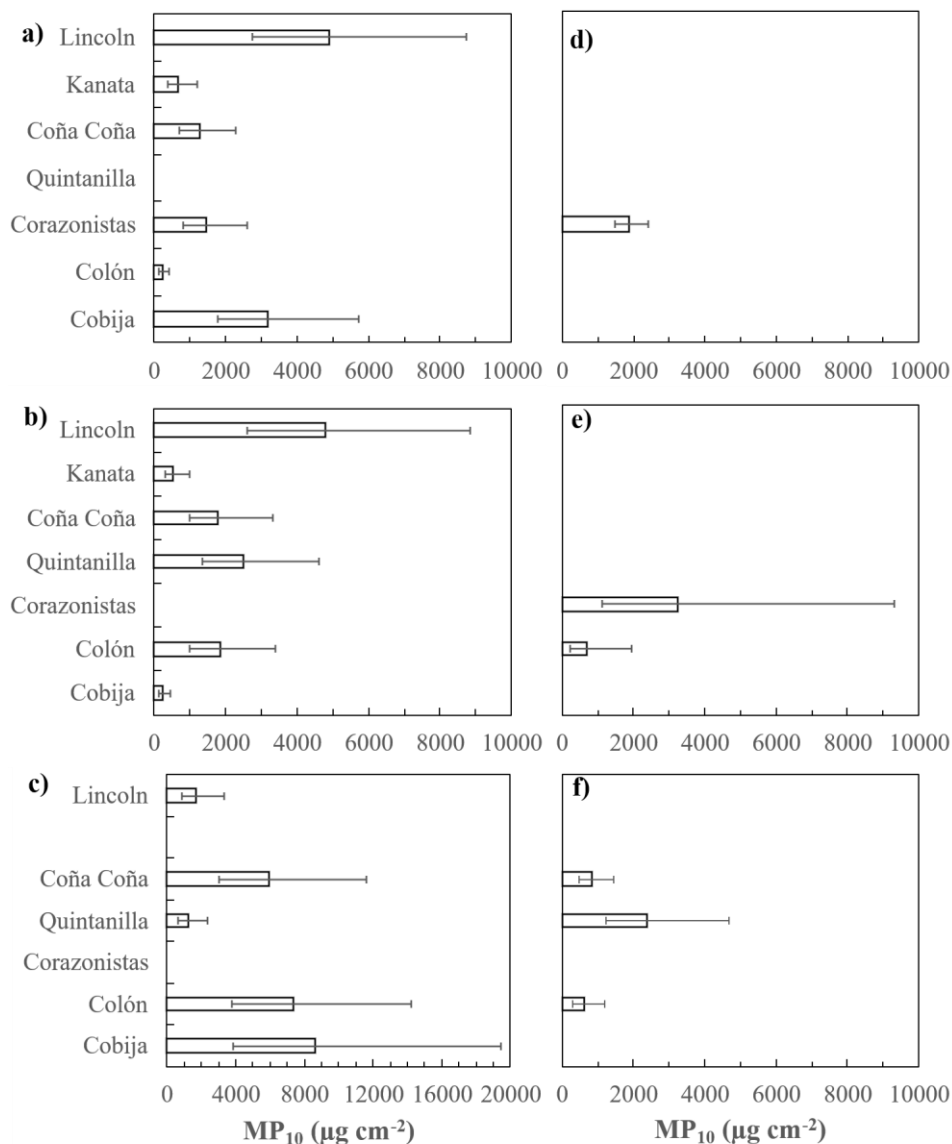
Al realizar el análisis comparativo entre parques para cada una de las especies se encontró lo siguiente: El material particulado MP₁₀ adsorbido por las hojas de *Ficus benjamina* y *Schinus areira* presentaron diferencias significativas entre parques ($P=0,05$, ambos, Figuras 3a y 3b). Las otras especies estudiadas (*Jacaranda mimosifolia*, *Populus alba*, *Bauhinia variegata*, *Handroanthus impetiginosus*) presentaron diferencias no significativas en la adsorción de MP₁₀ entre parques ($P>0,05$, Figuras 3c a 3f, Tabla 1).

Para *F. benjamina*, se encontró menor cantidad promedio de MP₁₀ en la Plaza Colón ($233 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), mientras que el parque Kanata, Coña Coña y plaza Corazonistas presentaron valores promedios de 668, 1272, 1453 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente. La plaza Cobija y el parque Lincoln tuvieron los valores promedios más altos (3191 y 4890 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, Figura 3a). La mayor variabilidad en los valores obtenidos de MP₁₀ se observaron en la Plaza Cobija y el Parque Lincoln.

Schinus areira, presentó los valores más bajos de adsorción de MP₁₀ en la superficie de sus hojas en la Plaza Cobija y el Parque Kanata (251 y 537 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Los valores intermedios se encontraron en la plaza Colón, parque Coña Coña y plaza Quintanilla (1839, 1794 y 2488 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), mientras que el parque Lincoln presentó el promedio más alto y la mayor variabilidad de MP₁₀ (4782 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, Figura 3b).

Figura 3

MP_{10} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) medido en los parques o plazas de Cochabamba, para cada una de las especies estudiadas

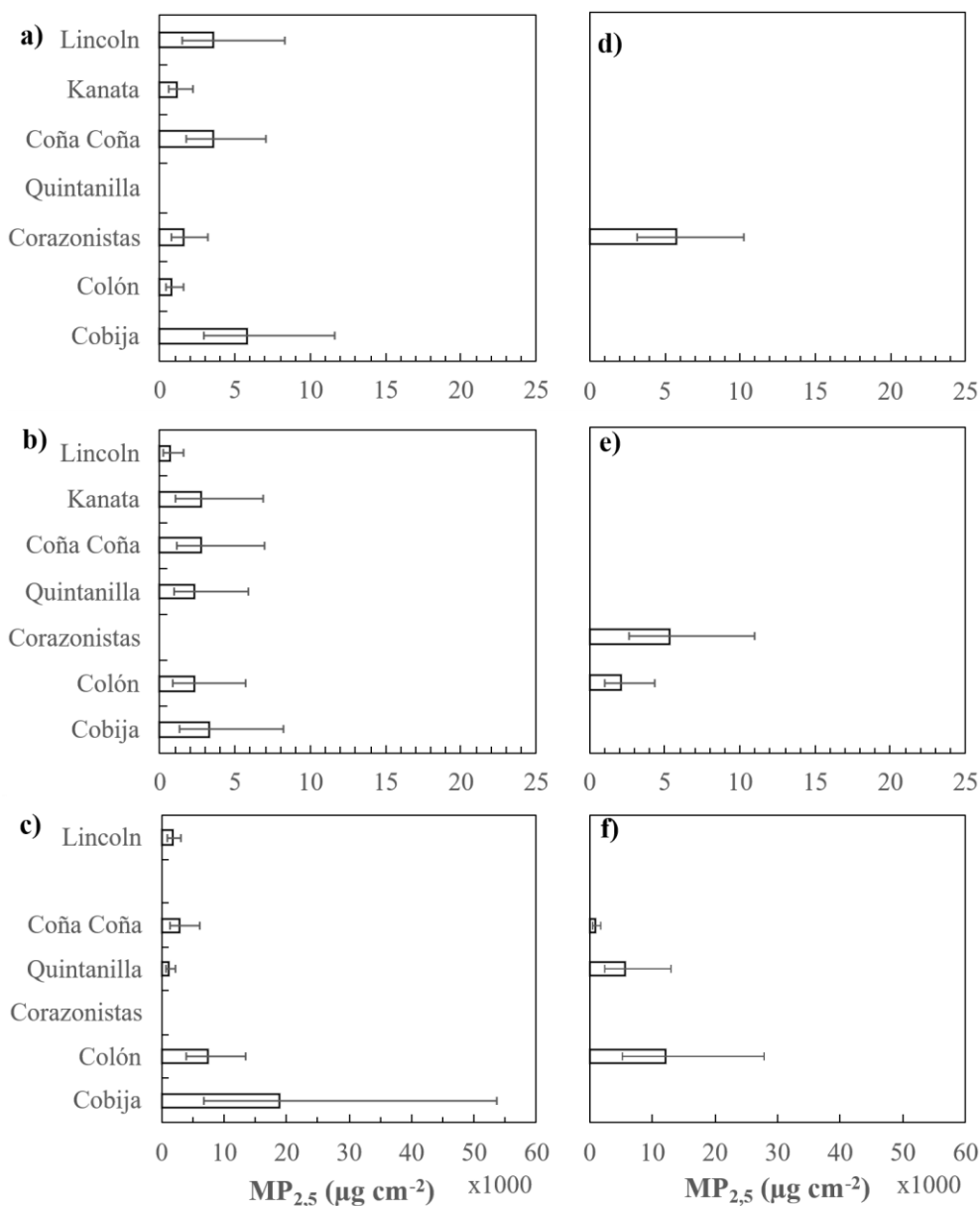


Nota: a) *Ficus benjamina*, b) *Schinus areira*, c) *Jacaranda mimosifolia*, d) *Bauhinia variegata*, e) *Handroanthus impetiginosus*, y f) *Populus alba*. Note el cambio de escala en c).

El material $MP_{2.5}$ adsorbido en la superficie de las hojas de los árboles estudiados fue mayor que el MP_{10} . El $MP_{2.5}$ también presentó diferencias no significativas al realizar la comparación entre parques para cada una de las seis especies de árboles muestreadas ($P>0,05$). En general, cada una de las especies presentó una alta variabilidad en sus promedios de $MP_{2.5}$ (barras de error en Figuras 4a a 4f). Entre todas las especies, destaca la gran variabilidad de *Jacaranda mimosifolia* en la plaza Cobija (Figura 4c) y *Populus alba* en la plaza Colón (Figura 4f), con una diferencia entre el límite superior e inferior del error estándar de $22.523 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ y $8.850 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ en la plaza Cobija y Colón, respectivamente.

Figura 4

$MP_{2,5}$ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) expresado en millares, medido en los parques o plazas de Cochabamba, para cada una de las especies estudiadas



Nota: a) *Ficus benjamina*, b) *Schinus areira*, c) *Jacaranda mimosifolia*, d) *Bauhinia variegata*, e) *Handroanthus impetiginosus*, y f) *Populus alba*. Note el cambio de escala en c) y f).

Finalmente, al evaluar el modelo general con los factores PLAZA, ESPECIE y la interacción PLAZA×ESPECIE se encontraron diferencias marginales entre plazas al evaluar el MP_{10} ($P=0,07$) considerando todas las especies estudiadas. En cambio, las diferencias medidas entre plazas para el $MP_{2,5}$ fueron no significativas ($P>0,05$) (ver Tabla 4). Al realizar en análisis para comparar la retención de MP_{10} entre plazas, se cuantificó que el parque Lincoln presentó valores mayores de adsorción de MP_{10} que los medidos en la plaza Colón ($P=0,01$), parque Kanata ($P=0,01$)

y Coña Coña ($P=0,05$). También se observó que las hojas de los árboles de la plaza Corazonistas presentaron mayor retención de MP_{10} que las hojas presentes en la plaza Colón ($P=0,04$) y el parque Kanata ($P=0,04$) (Figura 5).

Figura 5

MP_{10} ($\mu g \cdot cm^{-2}$) medido en los parques o plazas de Cochabamba

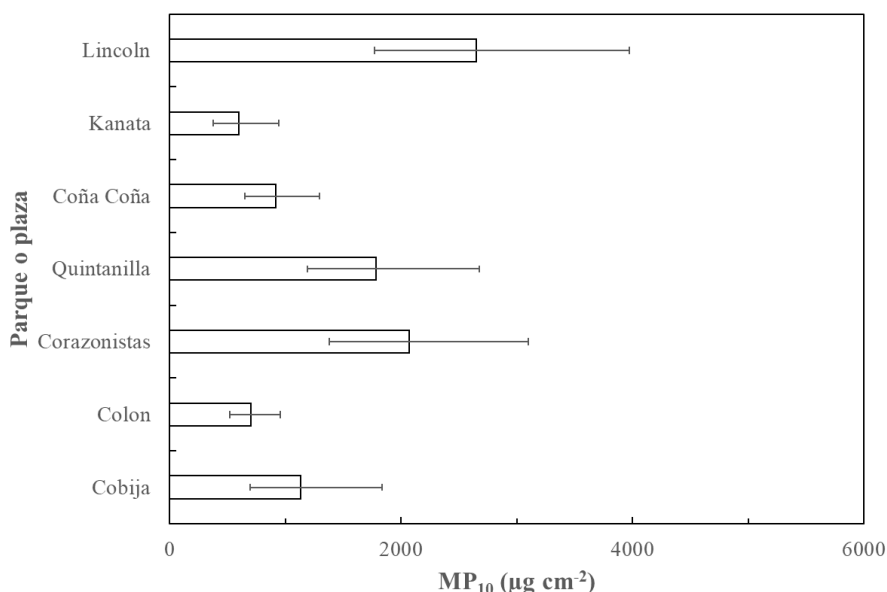


Tabla 4

Análisis de varianza para la comparación de MP_{10} y $MP_{2,5}$ entre zonas

MP	Efecto	GL num.*	GL den.†	Valor F	P > F
MP_{10}	Plaza o parque	6	38,5	2,11	0,07
	Especie	5	38,5	0,22	0,95
	Plaza*Especie	11	38,5	1,63	0,13
$MP_{2,5}$	Plaza o parque	6	38,5	0,87	0,52
	Especie	5	38,5	0,61	0,70
	Plaza*Especie	11	38,5	1,30	0,26

* grados de libertad del numerador, † grados de libertad del denominador

4. Discusión

En el presente trabajo se encontró que la producción de resinas de las hojas estuvo asociada con la retención del MP_{10} en dos especies (*Ficus benjamina* y *Schinus areira*). Mientras que no se observó ninguna relación con las características estudiadas para el $MP_{2,5}$ de las seis especies de árboles consideradas en Cochabamba. Asimismo, se determinó que existe una gran variabilidad en la retención del MP_{10} y $MP_{2,5}$ para cada una de las especies en los parques estudiados. Las excepciones fueron *Ficus benjamina* y *Schinus areira* que mostraron diferencias significativas en la adsorción de MP_{10} en las hojas de los árboles, al realizar las comparaciones entre plazas. Finalmente, se encontraron diferencias marginales entre las plazas o parques para MP_{10} .

Caracterización morfológica de las hojas de los árboles estudiados

Considerando las hojas compuestas de *S. areira*, *H. impetiginosus* y las hojas bicompuetas de *J. mimosifolia*, se esperaba que su arquitectura compuesta y bicompueta ayude a captar mayor cantidad de MP (Sæbø et al., 2012; Leonard et al., 2016; Ghasemian et al., 2017). Asimismo, *J. mimosifolia* presenta pelos en el borde de sus foliolulos, que actuarían como vellosidades y retendrían mayor cantidad de MP que las hojas lisas. De igual manera, el indumento lanoso de las hojas de *P. alba* podría haber retenido mayor cantidad de MP. Además, las resinas presentes en la superficie de *S. areira* y *F. benjamina* están asociadas con una mayor retención de MP, por resina que retiene material particulado de diferente tamaño, como lo reportaron Dzierżanowski et al. (2011) y Sæbø et al. (2012). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la retención de MP en la superficie de las hojas al comparar entre las especies. La ausencia de estas diferencias puede ser por el efecto homogeneizador del viento, que en la época estudiada asciende y desciende del valle a las montañas diariamente por el efecto de inversión térmica en el valle de Cochabamba (Gareca et al., 2023). De hecho, durante la recolección de MP en el presente trabajo se midieron velocidades del viento superiores a las requeridas para extraer el MP de los árboles especialmente en horas de la tarde, por lo que la recolección se hizo en otro momento.

La resuspensión del MP puede verse afectada por factores ambientales o abióticos como el clima xérico-seco, la inversión térmica y la alta variabilidad de MP presente entre las especies (Barrueta-Tello, 2022). Por tanto, una de las razones que explicaría la ausencia de diferencias significativas en la adsorción de MP es la existencia de un equilibrio entre los factores bióticos y abióticos que modifican la adsorción del MP en la superficie de las hojas de los árboles de la ciudad de Cochabamba (Figura 6).

Por otro lado, considerando las glándulas oleíferas presentes en la superficie de las hojas de *S. areira* que segregan resinas y las resinas secretadas por la mosca blanca en la superficie de las hojas de *F. benjamina*, estos compuestos orgánicos permitirían retener mayor MP al evitar su resuspensión. Esto explica el hecho que se encontraron diferencias marginalmente significativas entre parques en MP₁₀ para ambas especies.

En *F. benjamina* se encontró mayor MP₁₀ en los parques y plazas con una mayor cobertura arbórea (plaza Cobija y Parque Lincoln). La plaza Colón presentó menor cantidad promedio de MP₁₀ y una menor cobertura arbórea (Google Earth, imagen satelital Airbus 2025). En *S. areira*, el promedio más alto de MP₁₀ también se observó en el Parque Lincoln (Figuras 3a y 3b).

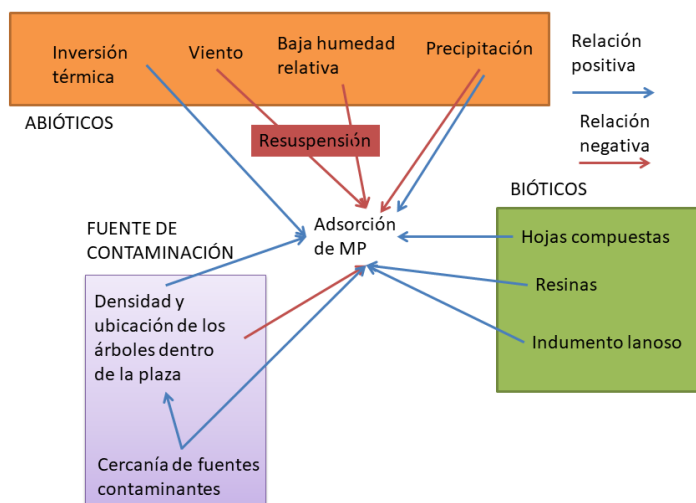
La resuspensión del MP en Cochabamba causada por sus características abióticas (Figura 6) pudo homogenizar la adsorción del MP en el área de estudio para todas las especies evaluadas (p. ej. inversión térmica, sequedad del ambiente, fuertes vientos, Barrueta-Tello, 2022; Jiang et al., 2024; Miele-Giler et al., 2024).

Esto explica el hecho de que no se encontraron diferencias significativas en la adsorción del MP entre parques y plazas para cuatro de las seis especies estudiadas. En cambio, *S. areira* y *F. benjamina*, presentaron diferencias marginalmente significativas en la adsorción del MP₁₀ entre los parques y plazas estudiados posiblemente por sus resinas y exudados presentes en la superficie de sus hojas como se observa en la Figuras 2d y 2e. De hecho, se encontró que el MP se inmoviliza al incrustarse en las resinas, lo que causa que el proceso de resuspensión sea menor en este tipo de hojas (Przybysz et al. 2014).

Por otra parte, se sabe que el tipo de hábito foliar de los árboles (hojas caducifolias vs. perennes) puede afectar más a la retención del MP que una agrupación taxonómica o incluso rasgos foliares individuales (Corada et al. 2021). Las especies perennes en nuestro caso fueron *S. areira* y *F. benjamina*. Sin embargo, las hojas bicompuetas de *J. mimosifolia* retuvieron menor cantidad de MP que las hojas lisas y compuestas de *S. areira*. Nuevamente, la explicación son glándulas oleíferas presentes en la superficie de las hojas de *S. areira* que segregan resinas y permitieron retener mayor MP.

Figura 6

Esquema de los factores abióticos y bióticos que afectan en la adsorción del material particulado



Al respecto, Chen et al. (2024) encontraron que la mayor cantidad de ceras en la superficie de las hojas está relacionada con una mayor acumulación de MP en estas. Las otras especies con hojas con escaso indumento y sin resinas como *Bauhinia variegata* y *Handroanthus impetiginosus*, retuvieron menor cantidad de MP.

Comparación de MP_{10} y $MP_{2,5}$ entre plazas y parques

En general, se observó una gran variabilidad en la cantidad de MP_{10} y $MP_{2,5}$ dentro de cada parque o plaza para todas las especies (Figuras 3 y 4). Esta variabilidad sugiere que las características del micrositio donde se encuentra cada individuo en su plaza o parque influyen en la adsorción de MP en las hojas, y puede revelar factores no evaluados en el presente estudio o indicar altas concentraciones en zonas muy puntuales de los parques y plazas evaluados. Una de estas características podría ser la proximidad a la fuente de los contaminantes, es decir, la adsorción de MP sería diferente entre un árbol ubicado cerca de una esquina donde es cruce de automóviles en comparación con otro individuo de la misma especie que se encuentra en el centro del parque o la plaza (Vieco-Zapata, 2014).

Li et al. (2023) encontraron mayor cantidad de MP en árboles al centro de la carretera en comparación con árboles a un costado de la misma, resaltando la variación existente a una pequeña escala geográfica, de manera similar a lo reportado en el presente estudio. De igual manera, Zegarra-Peña (2018) no encontró diferencias significativas entre zonas y tiempos de muestreo en un estudio realizado en Cuenca, Ecuador, aunque sí encontró diferencias entre especies. Una sugerencia para reducir esta variabilidad en futuros estudios, es incrementar el número de árboles muestreados en cada plaza para captar esta variación y medir otras variables, como p. ej. la distancia a la fuente del contaminante. Por tanto, las hojas de los árboles pueden utilizarse para evaluar la deposición de MP_{10} y $MP_{2,5}$ a una escala de plaza o parque. Se podrían estudiar los factores que afectan a esta escala como posición del árbol, cercanía a las fuentes de contaminantes, número de vehículos y tipo que circula por las calles o avenidas, entre otros.

Respecto a la alta variación de $MP_{2,5}$ observada en *Jacaranda mimosifolia* y *Populus alba* (Figuras 4c y 4f), el factor que pudo influir es el riego de las áreas verdes. En los parques y plazas estudiados de Cochabamba, este riego se

realiza desde cisternas a aproximadamente 3-5 m de altura que circulan por sus límites, y que en ocasiones riegan el follaje de los árboles. Si el follaje fue regado, se pudo remover el MP de las hojas de los árboles ubicados solo en las aceras y causar la gran variabilidad observada dentro de parques. Por ejemplo, es posible que se haya regado al follaje de dos de los tres individuos muestreados en una plaza o parque unos días antes del muestreo y que se haya removido su $MP_{2,5}$, obteniéndose valores bajos de $MP_{2,5}$. En cambio, el árbol que no fue regado, presentó mayor cantidad de $MP_{2,5}$ que los otros dos individuos, lo que aumentó la variabilidad de los datos observada en el presente trabajo.

El resultado del análisis del modelo general que determinó una diferencia marginal entre plazas para el MP_{10} se debe tomar con cautela, ya que indica que pueden existir diferencias entre plazas. En el contexto del presente trabajo estas diferencias podrían ser causadas por factores ambientales que son diferentes entre parques o plazas como el viento, la humedad relativa, precipitación y patrones de riego (Ghasemian et al., 2017; Jiang et al., 2024). Así también es importante mencionar el rol que cumplen la concentración del contaminante y su fuerza de emisión. Por ejemplo, el tráfico vehicular puede generar diferencias por la proximidad de la circulación de vehículos de alto tonelaje en los alrededores de algunos parques, como p. ej. el parque Lincoln.

El viento, temperatura, humedad relativa y precipitación influyen sobre la dispersión del MP en el aire de las ciudades. Un viento fuerte y constante puede transportar partículas a largas distancias, incluso reduciendo su concentración en el punto de emisión. El viento también es uno de los principales factores que influyen en la resuspensión del MP (Li et al., 2025). La topografía del terreno también es importante, ya que zonas rodeadas de montañas, como los valles de Cochabamba, presentan inversión térmica (Barrueta-Tello, 2022), es decir que una capa de aire frío retiene al aire caliente sobre la ciudad en forma de smog, lo que dificulta la disipación del MP. Por otra parte, en climas cálidos y secos, como en Cercado, Cochabamba, la resuspensión de partículas es más frecuente, lo que incrementa la concentración de MP en el aire. Por tanto, los factores meteorológicos desempeñan un papel crucial en la distribución del MP, afectando tanto su concentración como su distribución geográfica (Jiang et al., 2024).

Los factores meteorológicos mencionados anteriormente pudieron incidir en la variabilidad de los resultados obtenidos, pues Cochabamba es un valle seco donde el MP puede suspenderse, y presenta inversión térmica, especialmente en invierno. La inversión térmica, forma una capa de smog sobre la ciudad que aumenta la concentración de MP en las mañanas. Esto se agrava sobre todo por el incremento de tráfico vehicular, en el que son frecuentes los vehículos a motor diésel y antiguos.

Respecto a las características de la superficie de las hojas, Li et al. (2025), encontraron que, a mayor rugosidad de las superficies de las hojas, hay una menor resuspensión. Por tanto, las hojas con mayor cantidad de pelos o pubescencia podrían tener mayor material particulado. En el presente trabajo no encontramos esta relación, pues en *P. alba*, que tiene un indumento en forma de lana con alto potencial para retener MP, no presentó valores altos de retención o adsorción del mismo. Las dos especies en las que hubo diferencias significativas de retención de MP_{10} , *Ficus benjamina* y *Schinus areira*, presentaron resinas en la superficie de sus hojas. Esto indica que las resinas fueron más importantes que el indumento de las hojas y también su forma en la adsorción de MP en Cochabamba. El área foliar de los individuos de las especies es considerada uno de los factores más influyentes en la capacidad de retención del MP, a mayor área foliar de una copa se presenta un mayor potencial de remoción de MP del aire (Vieco-Zapata, 2014). En el presente trabajo estimamos la retención en una superficie de las hojas de los árboles (1 cm^2), pero no en la superficie de hojas presente en todo el volumen de la copa de un árbol. Por este motivo, se sugiere estimar el área foliar total presente en todas las copas de los árboles en subsiguientes estudios.

Previamente, se recomendó fomentar el uso del molle, jacarandá y carnavalito por ser árboles nativos que retienen cantidades importantes de MP en la superficie de sus hojas en Cochabamba (Gareca et al., 2023). En el presente trabajo y a pesar de la alta variabilidad de los valores observados, el molle (*S. areira*) y el jacarandá (*J. mimosifolia*)

son nuevamente las especies recomendadas para realizar este servicio ecosistémico de regulación del MP presente en el aire de la ciudad de Cochabamba. El molle, además es siempre verde, lo que hace que ofrezca este servicio a lo largo de todo el año, en cambio el jacarandá lo brinda cuando cuenta con sus hojas. No recomendamos la plantación de *F. benjamina* por ser exótico y hospedero de la mosca blanca, cuya interacción es la que facilita la adsorción de MP en la superficie de sus hojas, y no así su propia naturaleza.

5. Conclusión

El presente trabajo muestra la capacidad de los árboles para adsorber y acumular MP del aire, removiendo este importante contaminante del entorno urbano y ofreciendo así un servicio de regulación de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba.

A pesar de las diferencias morfológicas y de presencia de resinas entre las seis especies de árboles estudiadas, no se encontraron diferencias en su capacidad de adsorber y retener MP_{10} y $MP_{2.5}$. Posiblemente, esto se dio por factores ambientales como el viento, inversión térmica y clima-xérico seco de Cochabamba y porque en el presente estudio no se consideró toda la superficie de hojas de las copas de los árboles.

Respecto a los parques y plazas, se encontró una alta variación en los valores de MP dentro de los parques y plazas, que abre las puertas para futuros estudios relacionadas a encontrar las causas de esta variación, posiblemente asociadas a la cercanía de las fuentes de contaminantes atmosféricos o al riego de las áreas verdes realizado por cisternas que puede lavar las hojas en algunos casos.

Asimismo, se encontraron diferencias marginalmente significativas (evidencia de posibles diferencias) entre plazas y parques para la adsorción de MP_{10} para *S. areira* y *F. benjamina*, las únicas dos especies que presentaron resinas en la superficie de sus hojas. Estas resinas son de origen natural para *S. areira* y de origen por una interacción entre *F. benjamina* y la mosca blanca (*Singhiella simplex*). Esto sugiere que la producción de resinas en el indumento de las hojas fue más importante que las zonas de la ciudad o parques y plazas estudiadas para determinar la cantidad de MP adsorbido en las hojas de los árboles.

Observamos que las hojas de *F. benjamina* y *S. areira* adsorbieron la mayor cantidad de MP_{10} en el Parque Lincoln. Consideramos que este parque en general al estar rodeado de edificaciones, presenta menos flujo de aire y por tanto, el MP_{10} se acumula y adsorbe en la superficie de las hojas de estas dos especies. En cambio, para *F. benjamina*, la adsorción fue menor en la plaza Colón, posiblemente por el riego y cuidado más frecuente. *S. areira* presentó la menor cantidad de MP_{10} en la plaza Cobija y parque Kanata. Al ser estos resultados marginalmente significativos, es necesario continuar con el muestreo a lo largo de los años y evaluar más variables asociadas con la deposición del material particulado, así como cuantificar el MP acumulado en toda la superficie de la copa de los árboles.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

6. Referencias bibliográficas

- Awasthi, A., Sinha, B., Hakkim, H., Mishra, S., Mummidivarapu, V., Singh, G., Ghude, S. D., Kumar-Soni, V., Nigam, N., Sinha, V., & Rajeevan, M. N. (2024). Biomass-burning sources control ambient particulate matter, but traffic and industrial sources control volatile organic compound (VOC) emissions and secondary-pollutant formation during extreme pollution events in Delhi. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 10279–10304. <https://doi.org/10.5194/acp-24-10279-2024>
- Barrueta-Tello, J. B. (2022). Material particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$ en la ejecución del proyecto "Mejoramiento, conservación por niveles de servicio y operación" en el tramo Quisqui-Jacas Chico del departamento de Huánuco. Perú. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/3261>

- Chen, L., Liu, C., Zhang, L., Zou, R., & Zhang, Z. (2017). Variation in tree species ability to capture and retain airborne particulate matter (PM_{2.5}). *Scientific Reports*, 7(1), 3206.
- Chen, S., Yu, H., Xu, L., Fei, F., Song, Y., Dong, M., & Li, W. (2024). Characterizing accumulation and negative effects of aerosol particles on the leaves of urban trees. *Environmental Pollution*, 340, 122812.
- Corada, K., Woodward, H., Alaraj, H., Collins, C. M., & de Nazelle, A. (2021). A systematic review of the leaf traits considered to contribute to removal of airborne particulate matter pollution in urban areas. *Environmental Pollution*, 269, 116104.
- Dzierżanowski, K., Popek, R., Gawrońska, H., Sæbø, 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. <https://doi.org/10.1080/15226514.2011.552929>
- Gareca, E. E. y Aguirre, L. F. (2023). El Parque Nacional Tunari y la región metropolitana Kanata de Cochabamba, sus amenazas y oportunidades. *Revista Hábitat*, 92, 20–33.
- Gareca, E. E., Rivero, M., Mercado, M., Prado-Velasco, P. E., Vargas, J. P., Tapia, R., y Bellot., I. (2023). Material particulado en la superficie de hojas de árboles nativos y exóticos de los CBU en la ciudad de Cochabamba. En Aguirre L. F., Delgado Burgoa, R. R., y Loza A. (Eds.), *Corredores Biológicos Urbanos y servicios ecosistémicos en el municipio de Cochabamba, Bolivia* (pp. 102–103). CBG-UMSS.
- Ghasemian, M., Amini, S., & Princevac, M. (2017). The influence of roadside solid and vegetation barriers on near-road air quality. *Atmospheric Environment*, 170, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.028>
- INE (Instituto Nacional de Estadística). (2012). Actualidad estadística parque automotor Bolivia 2012. <https://www.ine.gob.bo>
- Jiang, Y., Liu, C., Wen, C., & Long, Y. (2024). Study of summer microclimate and PM_{2.5} concentration in campus plant communities. *Scientific Reports*, 14, 3311. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52508-3>
- Leonard, R. J., McArthur, C., & Hochuli, D. F. (2016). Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 249–253.
- Li, S., He, C., Zhang, Y., Wang, L., Zhang, Y., Wei, C., & Zhang, L. (2023). Effects of different external factors on urban roadside plants for the reduction of airborne fine particulate matters. *International Journal of Phytoremediation*, 25(14), 1901–1912.
- Li, S., Li, Y., Meng, H., Cao, M., Wang, X., Zhang, T., Zhang, Z., & Zhang, W. (2025). Effect of multiscale plant traits on particulate matter resuspension. *Environmental Pollution*, 387, 127330. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.127330>
- Li, Y.; Wang, Y.; Rui, X.; Li, Y.; Li, Y.; Wang, H.; Zuo, J., & Tong, Y. (2017) Sources of atmospheric pollution: A bibliometric analysis. *Scientometrics* 112, 1025–1045.
- Li, W., Mao, Q., Wu, G., & Wu, J. (2024). Characteristics and sources of VOCs emission during the O₃ pollution prone season in an industrial city in Eastern China. *Aerosol and Air Quality Research*, 24, 240164. <https://doi.org/10.4209/aaqr.240164>
- Lim, S.S., Vos, T., Flaxman, A. D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., AlMazroa, M. A., Amann, M., Anderson, H. R., Andrews, K. G., Aryee, M., Atkinson, C., Bacchus, L. J., Bahalim, A. N., Balakrishnan, K., Balmes, J., Barker-Collo, S., Baxter, A., Bell, M. L., ... Ezzati, M. (2012). A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990–2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010. *The Lancet*, 380(9859), 2224–2260. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R. y Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>
- Missouri Botanical Garden. (s.f.) *Tropicos.org*. Recuperado en abril de 2026 de <https://www.tropicos.org>.
- OMS (Organización Mundial de la Salud) (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono: resumen ejecutivo. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345334>
- Ould-Dada, Z., & Baghini, N. M. (2001). Resuspension of small particles from tree surfaces. *Atmospheric Environment*, 35(22), 3799–3809.
- Peña, M. y Castro, F. (2024). Determinación de áreas afectadas por incendios forestales en Bolivia,

- periodo junio-octubre 2024. IBIF. Santa Cruz de la Sierra. Bolivia
- Przybysz, A., Sæbø, A., Hanslin, H. M., & Gawroński, S. W. (2014). Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*, 481, 360–369.
- Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (MoniCA). (2021). Contaminación atmosférica gestión 2021. Sistema Automático. Editor: A. M. Terán M. Gobierno Autónomo Municipal de Cochabamba. Secretaría de Planificación y Medio Ambiente. Depto. de Gestión Atmosférica.
- Rivero, M., Alvarez, M., Antezana, H., Castellón, S. y Campero M. (2019). Evaluación y efecto de los plaguicidas en ecosistemas acuáticos de la Cuenca del Valle Alto de Cochabamba-Bolivia. Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental, UMSS 1–56.
- Rivero, M., Alvarez, M., Antezana, H., Castellón, S. y Prado P. (2024). Uso y Manejo de los plaguicidas, su efecto en el medio ambiente y en la salud de la población de Bolivia. Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos, Centro de Aguas y Saneamiento Ambiental. UMSS Cochabamba – Bolivia.
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H. M., Gawronska, H., & Gawronski, S. W. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *The Science of the Total Environment*, 427-428, 347–354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.084>
- Ventura Canaviri, N., Morales Ojeda, I. y Santané-Gelabert, R. C. (2020). Contaminación atmosférica y enfermedades respiratorias en Cochabamba, Bolivia. *Revista Cuidarte*, 11(1), 1–9.
- Vieco-Zapata, M. E. (2014). Estimación de la remoción de material particulado por parte de tres especies arbóreas en un corredor vial de Medellín. [Trabajo de grado de Ingeniera Ambiental. Escuela de Ingeniería de Antioquia]. Colombia
- Wang, X., Wang, Y., Qu, X., Huang, B., Huangz, B., Li, Z., Sun, Z., Sun, J., We, X. & Yang, X. (2021). Urban trees in university campus: Structure, function, and ecological values. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 28, 45183–45198. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13841-6>
- Weather Atlas. 2025. Climate and monthly weather — Cochabamba, Bolivia. <https://www.weather-atlas.com/en/bolivia/cochabamba-climate>
- Weber, F., Kowarik, I., & Säumel, I. (2014). Herbaceous plants as filters: immobilization of particulates along urban street corridors. *Environmental Pollution*, 186, 234–40. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.011>
- Xing, Y., Brimblecombe, P., Wang, S., & Zhang, H. (2019). Tree distribution, morphology and modelled air pollution in urban parks of Hong Kong. *Jornal of Environmental Management*, 248, 109304.
- Zegarra-Peña, R. R. (2018). Determinación de especies vegetales para la captura y retención de material particulado en la zona urbana de la ciudad de Cuenca. [Tesis de grado Ingeniero Ambiental, Universidad de Cuenca.]