

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES



**“RESERVA DE CARBONO Y RETENCIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO EN ÁRBOLES DEL CAMPUS DE LA PONTIFICIA
UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ”**

Presentada por:

ALEX NINA QUISPE

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO

MAGISTER SCIENTIAE EN CIENCIAS AMBIENTALES

Lima - Perú

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**“RESERVA DE CARBONO Y RETENCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN
ÁRBOLES DEL CAMPUS DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
PERÚ”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ALEX NINA QUISPE

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado

.....
Dr. Edgar Sánchez Infantas
PRESIDENTE

.....
Ph.D. Carlos Reynel Rodríguez
ASESOR

.....
Ph.D. Norma Salinas Revilla
CO-ASESOR

.....
Ph.D. Sergio Pacsi Valdivia
MIEMBRO

.....
Mg.Sc. Zulema. Quinteros Carlos
MIEMBRO

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a todas aquellas personas apasionadas, que sienten respeto y admiración por las plantas, en especial por los árboles; a personas que reconocen el valor intrínseco de estos seres que, desde hace mucho tiempo cual arquitectos, vienen acondicionaron nuestro planeta para la supervivencia de miles de formas de vida.

Para todas aquellas personas que plantaron y cuidaron un árbol y que ahora disfrutan de su compañía, recordándonos diariamente nuestra breve estadía en este mundo, el cual, no será suficiente para lograr conocerlos y comprenderlos plenamente.

Para el M.Sc. Carlos A. Llerena Pinto, que junto a mi papá ahora descansan en paz en la gloria de Dios, desde ahí me enviaron su aliento y compañía para la realización de este trabajo.

Alex Nina Q.

AGRADECIMIENTO

Ante todo, agradecer a Dios por brindarme salud y vida para disfrutar del maravilloso mundo de la **BIOLOGÍA**, por su compañía y protección en los trabajos de campo.

Mi eterno agradecimiento a la Dra. Norma Salinas y al Dr. Eric G. Cosio, por sus consejos y enseñanzas, por permitirme ser parte del Laboratorio de Ciencias Ecosistémicas – INTE – PUCP donde, junto a otros apasionados, desarrollamos diferentes estudios para seguir aprendiendo y conociendo, particularmente, por darme la oportunidad de aplicar esos conocimientos en los árboles de las ciudades.

Al Dr. Carlos A. Reynel por transmitir motivación y conocimientos en sus conferencias y clases, fue esa motivación que me dio el empuje para estudiar los árboles en las ciudades, junto a él, agradecer a todos mis profesores de la maestría en Ciencias Ambientales.

A nombre mío y el de toda mi familia, quiero agradecer a mis tíos Florencio y Valentina, a mis primos Melissa y Rubén por darme un segundo hogar y una segunda familia, por su apoyo incondicional, por abrirme las puertas y brindarme el calor de hogar.

Las gracias serán insuficientes para agradecer al compañero, mi amigo y hermano que desde hace mucho tiempo me acompaña en todos los desafíos, es su pasión y energía que me ayudan a realizar distintos trabajos de investigación, gracias Blgo. Rudi S. Cruz.

Muchas gracias a Estefanía Llerena, Mijaíl Cjuno, Manuel Marca, Fabian Limonchi, Kyria Heinemann por su enorme ayuda en los trabajos de campo y laboratorio.

Gracias a mi mamá Josefina, a mis hermanos Jessica, Yuri y Paola por estar siempre conmigo, a pesar de la distancia, el amor con el que fuimos criados no se ha desgastado, más aún, se vio fortalecido.

ÍNDICE GENERAL

I.	INTRODUCCIÓN	1
II.	REVISIÓN LITERARIA	3
2.1.	LA CIUDAD	3
2.1.1.	Ecología urbana	3
2.1.2.	Ciudades sostenibles.....	4
2.1.3.	Habitabilidad	5
2.1.4.	Infraestructura verde.....	5
2.1.5.	Cambio climático en las ciudades	6
2.1.6.	Inventarios forestales urbanos	6
2.2.	ÁREAS VERDES URBANAS	6
2.2.1.	Los árboles.....	7
2.2.2.	Áreas verdes urbanas en la ciudad de lima.....	7
2.3.	CALIDAD DE AIRE	8
2.3.1.	Composición del aire	9
2.3.2.	Contaminación atmosférica	9
2.3.3.	Material particulado.....	11
2.3.4.	Material particulado en la ciudad de lima.	16
2.3.5.	Estándares de calidad - Lima.....	17
2.4.	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SE)	18
2.4.1.	Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA).....	18
2.4.2.	Clasificación de los servicios ecosistémicos	18
2.4.3.	Servicios ecosistémicos en áreas verdes urbanas	20
2.4.4.	Servicios ecosistémicos de los árboles en una ciudad.....	21
2.5.	CARACTERES FUNCIONALES	22
2.5.1.	Caracteres de tallos.....	22
2.5.2.	Caracteres de hoja.....	23
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1.	MATERIALES	26
3.1.1.	Ubicación del área de estudio.....	26

3.1.2. Materiales de laboratorio	27
3.1.3. Instrumentos y equipos	27
3.2. MÉTODOS.....	27
3.2.1. Registro general de individuos arbóreos	27
3.2.2. Variables dasométricas	28
3.2.3. Geolocalización de individuos arbóreos.....	28
3.2.4. Determinación de las muestras botánicas.....	29
3.2.5. Estimación de la reserva de biomasa.....	30
3.2.6. Cuantificación del material particulado (mp) retenido.....	31
3.2.7. Cuantificación de Partículas Sólidas Sedimentables (PTSE) - Placas Receptoras..	32
3.2.8. Cuantificación de caracteres funcionales	33
3.2.9. Análisis de componente principales	35
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
4.1. INVENTARIO DE ÁRBOLES	36
4.2. MAPEO DEL ARBOLADO	36
4.3. ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN.....	36
4.4. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA.....	39
4.4.1. Estructura horizontal.....	39
4.4.2. Estructura vertical.....	41
4.5. ANÁLISIS DE LA BIOMASA AÉREA ALMACENADA.....	42
4.6. ANÁLISIS DE MATERIAL PARTICULADO	45
4.6.1. Material particulado en la atmosfera del campus	45
4.6.2 Material particulado (MP) retenido en las hojas	47
4.7. ANÁLISIS DE CARACTERES FUNCIONALES	52
4.7.1. Mediciones directas	52
4.7.2 Mediciones a través de análisis de imágenes.....	53
4.7.3. Asociación de caracteres funcionales	57
4.7.4 Caracteres funcionales en la reserva de carbono	60
4.7.5 Caracteres funcionales en la retención de MP suspendido.....	60
V. CONCLUSIONES	63
VI. RECOMENDACIONES	65
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
VIII. ANEXOS	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1: Servicios ecosistémicos en el ecosistema urbano	20
Cuadro 4.1: Características morfológicas foliares de las especies elegidas.	47
Cuadro 4.2: Características dasométricas de los individuos elegidos.	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación de las partículas según su diámetro aerodinámico.....	12
Figura 2.2: Distribución de partículas en función al diámetro.	13
Figura 2.3: Distribución del material particulado en el aparato respiratorio.....	14
Figura 2.4: Unidades vehiculares por cada mil habitantes en la ciudad de lima.....	16
Figura 2.5: Comportamiento histórico del pm ₁₀ y pm _{2.5} en la ciudad de lima.	17
Figura 2.6: Clasificación de los servicios ecosistémicos.....	19
Figura 2.7: Servicios ecosistémicos proveídos por los árboles en una ciudad.....	21
Figura 3.1: Mapa de ubicación que muestra el área de estudio (pucp).	26
Figura 4.1: Número de individuos por familia.	37
Figura 4.2: Número de géneros por familia.....	37
Figura 4.3: Número de individuos por género.....	38
Figura 4.4: Número de especies por género.	38
Figura 4.5: Número de individuos por especie.....	39
Figura 4.6: Área basal por familias.	40
Figura 4.7: Distribución del área basal por especies.	40
Figura 4.8: Distribución de individuos por categorías diamétricas.	41
Figura 4.9: Individuos arbóreos más altos.....	41
Figura 4.10: Altura promedio por especies.	42
Figura 4.11: Distribución de individuos en intervalos de altura.	42
Figura 4.12: Distribución de la biomasa en familias.	43
Figura 4.13: Contenido de biomasa por géneros.	44
Figura 4.14: Distribución de la biomasa por especies.	44
Figura 4.15: Distribución de la biomasa en categorías diamétricas.	45
Figura 4.16: Histórico de emisiones de pm ₁₀ y pm _{2.5} , Campo de Marte – Jesús María.	46
Figura 4.17: Retención de material particulado (g) /área foliar (m ²).....	49
Figura 4.18: Isolíneas de mp retenido (g/m ² área foliar) en los árboles muestreados.	50
Figura 4.19: Ubicación del material particulado a 50x (haz y envés).	51
Figura 4.20: Cuantificación de los caracteres funcionales en las diferentes especies.....	53
Figura 4.21: Porcentaje del área ocupada por las venas.....	54
Figura 4.22: Imágenes 3d de la superficie del haz de la hoja y su respectivo espectro.....	55
Figura 4.23: Imágenes 3d de la superficie del haz de la hoja y su respectivo espectro.....	56
Figura 4.24: Uúmero de estomas por mm ² de superficie foliar.....	57

Figura 4.25: Clúster de agrupación de especies	58
Figura 4.26: Análisis de componentes principales (acp).	58
Figura 4.27: Circulo de correlación de los caracteres funcionales evaluados.	59
Figura 4.28: Sobreposición de los gráficos ACP con el de Círculo de Correlaciones.	60

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.-factores que influyen en la capacidad de carga del medio receptor aire en lima.	78
Anexo 2.- registro de individuos arbóreos en el campus de la PUCP.....	79
Anexo 3.- algunas flores y frutos de especies llamativas	79
Anexo 4.- mapeo de los árboles en la PUCP.....	80
Anexo 5.- obtención del peso seco de las hojas muestreadas.....	81
Anexo 6.- mezcla obtenida a partir del lavado de las hojas colectadas.....	81
Anexo 7.- material particulado PM _{2.5} retenido por la membrana de teflón PTFE.	82
Anexo 8.- medidor de área foliar láser portátil ci-202	82
Anexo 9.- placas receptoras instaladas en la azotea del pabellón de física.	83
Anexo 10.- material particulado retenido por tricoma de <i>delonix regia</i>	83
Anexo 11.- material particulado retenido en la superficie de las hojas.....	84
Anexo 12.- impresión de estomas a) haz y b) envés.	85
Anexo 13.- registro de las especies encontradas, procedencia y cantidad.	86
Anexo 14.- histórico de la concentración de pm ₁₀ . fuente (SENAMHI)	90
Anexo 15.- histórico de la concentración de pm _{2.5} . fuente (SENAMHI).....	90
Anexo 16.- concentración partículas suspendidas totales en las placas receptoras.....	91
Anexo 17.-valores de caracteres funcionales de los 30 individuos muestreados y la cantidad de material particulado retenido.....	92
Anexo 18.- correlación de Pearson entre la cantidad de mp retenido por m ² de área foliar y la distancia del árbol con respecto a las calles y avenidas que los rodean.....	93

RESUMEN

Las áreas verdes urbanas, son un aliado estratégico en la formulación de políticas orientadas al manejo de los problemas ambientales vinculados al crecimiento de las ciudades. El objetivo del presente estudio fue, establecer la importancia de los árboles como reservorio de carbono y como superficie de retención de material particulado suspendido en un área verde urbana como el campus de la PUCP, y considerando los caracteres funcionales de las especies arbóreas, establecer especies con mayor capacidad para brindar dichos servicios. Inicialmente se obtuvo información dasométrica y taxonómica de todos los individuos arbóreos del campus de la PUCP, en base a esta información y utilizando ecuaciones alométricas, se cuantificó el carbono almacenado. Para la cuantificación del material particulado retenido sobre las hojas, se eligieron las 10 especies más comunes y empleando procedimientos gravimétricos y en base a metodologías establecidas, se determinaron las especies que muestran una mayor retención, paralelamente se midieron caracteres funcionales de tallos y hojas de estas especies. Los resultados muestran que se registraron 1268 individuos arbóreos, ordenados en 108 especies taxonómicas, de los cuales el 27.7 % corresponde a la flora nativa. El cálculo de la reserva de carbono en los árboles asciende a 145.847 t siendo Fabaceae, Myrtaceae y Meliaceae las familias que almacenan más del 50 %. En cuanto a la retención de material particulado, *Ficus benjamina*, *Brachychiton acerifolius* y *Tipuana tipu*, son las especies que acumulan mayor cantidad de material particulado, sobrepasando los 2.5 g/m² de área foliar. La cantidad de carbono almacenado por los árboles del campus, demuestra que las áreas verdes urbanas pueden ser un importante sumidero de carbono y del mismo modo se demostró que las hojas retienen material particulado, atenuando el contacto directo con las personas. Finalmente, considerar árboles con los caracteres funcionales adecuados, favorece a que estos servicios sean proveídos eficientemente.

Palabras clave: material particulado, áreas verdes, árboles, caracteres funcionales.

ABSTRACT

Urban green areas are a strategic ally in the formulation of policies aimed at managing environmental problems linked to the growth of cities. The goal of this study was to establish the importance of trees as a carbon reservoir and as a retention surface for suspended particulate matter in an urban green area such as the PUCP campus, and considering the functional characteristics of tree species, to establish species better able to provide these services. Initially, dasometric and taxonomic information was obtained for all tree individuals on the PUCP campus, and based on this information and using allometric equations, the carbon stored was quantified. For the quantification of the particulate matter retained in the leaves, the 10 most common species were chosen and using gravimetric procedures and based on established methodologies, the species that show a higher retention were determined, in parallel, functional characteristics of stems and leaves of these species were measured. The results show that 1268 arboreal individuals were recorded, arranged in 108 taxonomic species, of which 27.7% corresponds to the native flora. The calculation of the carbon stock in the trees amounts to 145,847 t, with Fabaceae, Myrtaceae and Meliaceae families storing more than 50%. Regarding the retention of particulate matter, *Ficus benjamina*, *Brachychiton acerifolius* and *Tipuana tipu*, are the species that accumulate the highest amount of particulate matter, exceeding 2.5 g/m² of leaf area. The amount of carbon stored by the campus trees shows that urban green areas can be an important carbon sink, and it was also demonstrated that the leaves retain particulate matter, attenuating direct contact with people. Finally, considering the appropriate functional characteristics favors the efficient provision of these services.

Key words: particulate matter, green areas, trees, functional traits.

I. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población humana en las ciudades cada vez es mayor. El año 2014 el 54 % de la población mundial habitaba los centros urbanos y para el 2050 este porcentaje se estima que alcanzará el 66 % (APUFM 2016). Para Latinoamérica (EIU 2010) estima que, el año 2030 el 86 % de la población se ubicará en los espacios urbanos, debido a las mayores oportunidades de trabajo que estas ofrecen y a problemas sociales y económicos que presentan las zonas rurales. Esta alta concentración demográfica en las ciudades viene generando problemas ambientales que progresivamente se hacen más evidentes, como la contaminación del aire, agua y suelo, la deforestación, la alteración del ciclo hidrológico o la degradación de la tierra, entre otros generando en algunos casos problemas en la salud de los habitantes. Según la APUFM (2016) se necesitan urgentemente estrategias que ayuden a las ciudades a lograr objetivos de desarrollo sostenible y así forjar ciudades con calidad de vida para sus habitantes.

En la conferencia Habitat II-Estambul (ONU 1996) se indicó que la calidad de vida de las personas, no está determinada únicamente por factores económicos, sociales y ecológicos, sino que también se deben considerar las condiciones físicas y espaciales de las ciudades, también sugieren que, en las estrategias de desarrollo sostenible se deben considerar las áreas verdes.

García *et al.* (2015) mencionan que, la ciudad de Lima carece de una planificación adecuada, existiendo una reducida disponibilidad de espacios destinados a las áreas verdes, en la mayoría de los distritos. Los resultados obtenidos por el IMP (2010) se observó que, pocos distritos cumplen con los indicadores, basados en la distancia y el tamaño, sugeridos por la WHO (2016).

Mediante funciones inherentes a las plantas, el arbolado urbano, ofrece servicios ecosistémicos que influyen directamente en la salud y el bienestar de sus habitantes, siendo los principales; la disminución de la contaminación del aire, la atenuación del ruido y las oportunidades para la recreación (APUFM 2016). Los árboles proveen de oxígeno, reducen

la temperatura ambiental, conservan el agua y promueven la biodiversidad, por todo ello Priego (2002) manifiesta que, los árboles constituyen componentes importantes en las ciudades, debido a que modifican el espacio en el que fueron plantados. American Forest (2007) señala que, los árboles son indicadores de la salud ecológica de una comunidad, así como de la salud de un ecosistema urbano, pues mediante sus funciones biológicas pueden regular la calidad del aire que respiran sus habitantes. La escasa base científica disponible sobre el acondicionamiento de ecosistemas urbanos para el desarrollo adecuado de la vegetación arbórea, y el empleo de especies arbóreas inapropiadas en lugares inadecuados, limitan la eficiencia de sus servicios ecosistémicos (PAOT 2003).

El objetivo de la presente investigación fue cuantificar servicios ecosistémicos de regulación de la calidad del aire como, la reserva de carbono y retención de material particulado atmosférico, en un área de arbolado urbano ejemplificado en el campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima. Tomando en cuenta los caracteres funcionales, propone establecer aquellas especies arbóreas con mayor capacidad para brindar estos servicios ecosistémicos.

II. REVISIÓN LITERARIA

2.1. LA CIUDAD

Para el surgimiento de las ciudades, el hombre tuvo que ser sedentario, en ese sentido Casado (2010), menciona que existen dos tesis sobre el origen de las ciudades: a) la funcional, que considera la ciudad como un centro de comercio, a partir de la cual se generan otras actividades y b) la tesis de centro político, que habría surgido a partir de la relación de una clase dominante con un dominio político, administrativo y religioso. Cualquiera fuera el origen de las ciudades, a lo largo de la historia sus habitantes, siempre buscaron los medios necesarios para atender y satisfacer sus necesidades, transformando y adecuando el espacio donde habitaban. Este espacio físico con el tiempo fue extendiéndose considerablemente, sobrepasando los límites originales y generando grandes metrópolis. Antagónicamente a este crecimiento, la extensión de las áreas naturales se fue reduciendo drásticamente.

Actualmente las ciudades continúan creciendo, en ese sentido, la Economist Intelligence Unit (2010), estima que, en Latinoamérica el 2030, el 86 % de la población se ubicará en los espacios urbanos, debido a las mayores oportunidades de trabajo que estas ofrecen, también a los problemas sociales y económicos en las zonas rurales. Esta alta concentración demográfica en las ciudades genera problemas ambientales que, progresivamente se hacen más evidentes. Algunos de estos problemas son, la contaminación del aire, agua y suelo, la deforestación, la alteración del ciclo hidrológico o la degradación de ecosistemas, fortaleciendo cada vez más lo manifestado por Odum & Barrett (2006, 311) *"Las grandes ciudades se desarrollan y se hacen parásitas del campo. Los seres humanos deben evolucionar hasta la etapa de mutualismo en relación con la naturaleza. Si la humanidad no alcanza el mutualismo con la naturaleza, entonces, igual que los parásitos "poco sabios" o "desadaptados", quizá explote a su huésped hasta el punto de destruirse a sí misma"*.

2.1.1. Ecología urbana

Grimm *et al.* (2008), señalan que ecología urbana es una ciencia que se ocupa de los procesos efectuados en los sistemas ecológicos urbanos, para ello relaciona las teorías y metodologías de las ciencias naturales con las ciencias sociales, por otro lado Angeoletto

(2012) y Young (2009) ponen de manifiesto el carácter interdisciplinario de la ecología urbana, pero manifiestan que la tradición intelectual occidental no ha logrado integrar naturaleza y sociedad, generando así una insuficiente base teórica respecto a las interrelaciones entre ecología y sociedad.

Los ecosistemas urbanos, durante el siglo XX recibieron poca atención por parte de los ecólogos, consecuentemente un escaso conocimiento ha sido generado con el objeto de solucionar problemas ambientales urbanos (Grimm *et al.* 2008). Desafortunadamente, a pesar de que las poblaciones urbanas dependen de una amplia gama de servicios ecosistémicos; la ecología general como la ecología urbana, no son completamente incorporadas en los planteamientos habituales que rigen la planificación urbana.

Se requiere prestar más atención a los estudios en ecología urbana, puesto que, el movimiento de las poblaciones rurales hacia las ciudades aumenta año tras año, por lo tanto, es necesario lograr una planificación ambiental adecuada para brindar una calidad de vida idónea a la población. Rogers (1997), afirma que la arquitectura y el planeamiento urbano necesitan evolucionar para ofrecer herramientas que contribuyan al establecimiento de ciudades sostenibles.

2.1.2. Ciudades sostenibles

Las dos terceras partes de la energía mundial son consumidas en las ciudades; el 90 % de ellas se encuentran ubicadas en las costas, expuestas a sufrir las consecuencias de eventos climáticos extremos (MINAM 2014b). Frente a esto, algunas ciudades vienen liderando procesos de transformación, por ejemplo, cambiando el uso de combustibles fósiles por energías limpias, buscando así, un crecimiento sostenible.

La sostenibilidad en las ciudades no solo tiene que ver con la calidad ambiental, sino con el resultado de la compleja interacción entre el entorno ambiental, económico y social, donde el entorno ambiental es el referido a los recursos físico-naturales y construidos, el entorno económico considera todos los aspectos relativos a la producción, el consumo, la inversión, etc. y el entorno social tiene que ver con la calidad de vida de los ciudadanos, las interacciones entre estos tres entornos generarán efectos positivos y negativos, de manera que, si la suma de los efectos positivos es mayor que los efectos negativos la ciudad será sostenible (Mella 2003).

Las ciudades sostenibles garantizan un nivel de bienestar creciente a los ciudadanos, sin poner en riesgo el bienestar de otros y ayudan a reducir los impactos negativos sobre el

ambiente y los factores que inducen el cambio climático. Entre los ocho principios de una ciudad sostenible planteados en la COP20 de Lima, se encuentra el principio referido a mantener y recuperar espacios verdes como parques, ríos, zonas boscosas, etc.

2.1.3. Habitabilidad

Alcalá (2007) afirma que, la habitabilidad está determinada por un conjunto de condiciones óptimas que se relacionan y crean sensaciones de confort en lo biológico y psicosocial en el espacio donde el hombre habita y actúa, menciona también que es un proceso que integra físicamente la vivienda a la ciudad, mediante un adecuado acceso a servicios, equipamientos y un espacio público de calidad, por tanto, es necesario considerar aquellas políticas urbanas que podrían tener un impacto directo sobre la mejora de las condiciones habitacionales. Entre los ámbitos y ejes que deberían ser considerados en las políticas urbanas, se encuentran los espacios verdes urbanos.

2.1.4. Infraestructura verde

En la planificación y diseño de las áreas verdes urbanas se priorizan exclusivamente los beneficios sociales relacionados con la recreación y belleza escénica, postergando beneficios ecológicos que estos proveen. Desde este punto de vista, las áreas verdes urbanas vienen a ser espacios bien delimitados donde el hombre manipula y moldea la naturaleza adaptándola a sus propios fines sean estos productivos, estéticos, recreativos, etc., (Thompson 2002). Esta podría ser la razón por la que, en la planificación urbana se subestime el rol de las áreas verdes en el desarrollo de las ciudades, y por consiguiente tengan un bajo interés político y una asignación de presupuesto limitado (Smaniotto *et al.* 2008). Pero bajo el concepto de infraestructura verde, las áreas verdes urbanas son lugares que proveen servicios ecológicos y sociales como la, regulación climática, purificación del aire, reducción de ruido, entre otros, integrando de esta manera el crecimiento urbano, el bienestar social y la protección del ambiente (Vásquez 2016).

En agosto de 1999, el Fondo de Conservación y el Servicio Forestal del USDA desarrolló un programa de capacitación que ayudaría a las comunidades a hacer de la infraestructura verde una parte integral de planes y políticas locales, regionales y estatales. Este Grupo desarrolló la siguiente definición (Benedict y Mc Mahon 2002): “La infraestructura verde es el sistema de soporte de vida natural de nuestra nación: una red interconectada de vías navegables, humedales, bosques, hábitats de vida silvestre y otras áreas naturales; vías verdes, parques y otras tierras de conservación; granjas de trabajo, ranchos y bosques; y

áreas silvestres y otros espacios abiertos que apoyan a las especies nativas, mantienen los procesos natural-ecológicos, sustentan los recursos de aire y agua y contribuyen a la salud y la calidad de vida de las comunidades y personas de Estados Unidos”.

2.1.5. Cambio climático en las ciudades

La UN-Habitat (2011) afirmó que las ciudades consumen más del 70 % de la energía del planeta y producen más del 60 % del CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI), estos valores convierten a las ciudades en las principales contribuyentes del cambio climático y tomando en consideración los problemas ambientales que está generando el acelerado crecimiento urbano, se prevé que las consecuencias del cambio climático en las ciudades cada vez serán más intensas.

La infraestructura verde puede favorecer a enfrentar las consecuencias del cambio climático, desarrollando la resiliencia del sistema urbano-ecológico, adaptando a las ciudades a través de la provisión de servicios ecosistémicos, que permiten contrarrestar los fenómenos relacionados con el cambio climático como, la reducción del efecto isla de calor, atenuación de las inundaciones, contaminación atmosférica, entre otros. (Gill *et al.* 2007).

2.1.6. Inventarios forestales urbanos

El módulo de inventario forestal de la FAO menciona que los inventarios, son la recolección sistemática de datos sobre los recursos forestales, permitiendo de esta manera evaluar el estado actual, sentando las bases para el análisis, la planificación y gestión forestal. Por otra parte, mediante el inventario forestal, se obtiene información acerca de la cantidad y calidad de los árboles que se encuentran en un área determinada. Brinda un registro actual de los árboles presentes en las ciudades, y es la dasonomía urbana la que permite el estudio, manejo y conservación del arbolado mediante inventarios, pues proporciona el reconocimiento de sus características, composición, densidad, estado físico y sanitario, a fin de determinar su situación actual y desarrollar planes de manejo y gestión (Rivas 2000).

2.2. ÁREAS VERDES URBANAS

El año 1994, representantes de ciudades europeas firmaron la Carta de Aalborg, donde se comprometieron, a colaborar con las iniciativas de la Agenda 21, a desarrollar programas de desarrollo sostenible e iniciar campañas de ciudades europeas sostenibles. Se iniciaron acciones centradas en la calidad del medio ambiente a través de áreas verdes o bosques urbanos, desde entonces las áreas verdes urbanas son protagonistas de un cambio en la

conciencia ambiental de los ciudadanos y de un cambio en las políticas públicas para mejorar la calidad de vida de las personas.

Según la ordenanza N°1852 de la Municipalidad Metropolitana de Lima (2014), *“las áreas verdes urbanas, son aquellas áreas o espacios verdes, capaces de sostener o en donde se pueden establecer toda clase de especies vegetales (plantas de cobertura, arbustos, macizos florales, palmeras, árboles, entre otros) sin restricción alguna”*.

Área verde es toda superficie terrestre con administración pública o privada, integrada con el área urbana y ocupada por diferentes formas vegetales, estableciendo así, un lugar apropiado para la generación de servicios importantes a los habitantes. Son considerados como áreas verdes los espacios abiertos con césped, parques, bosques urbanos y periurbanos, jardines, plazas, dotadas de características tales que puedan desempeñar diferentes funciones de asimilación en el ecosistema urbano y brindar satisfacciones directas e indirectas a la comunidad a partir de sus atributos físicos y estéticos (Defensoría del Pueblo 2010).

2.2.1. Los árboles

El hombre en su evolución encontró en los árboles refugio, alimento, medicina y materia prima logrando así su desarrollo. En este sentido los árboles son formas de vida complejas muy evolucionadas con las que compartimos este planeta. Muchas veces el concepto que nuestro pensamiento antropocentrista le dio al árbol, resulta insuficiente para describir lo que verdaderamente significa, tratar de interpretar a un árbol bajo nuestros sentidos, se verá limitado principalmente por nuestra temporalidad, pues los árboles ocuparon el planeta mucho antes que nosotros (Costa y Plumed 2016). Incluso los árboles urbanos, aquellos que están en nuestros jardines o en los lugares que frecuentamos, estuvieron desde mucho antes que nacéramos, por ello, mediante los recuerdos que los árboles rememoran en nosotros, relacionamos nuestra pertenencia en el tiempo y el espacio a un lugar determinado.

2.2.2. Áreas verdes urbanas en la ciudad de lima

Según Bonilla (2009), fue el virrey Manuel Amat y Junyent, que más embelleció Lima influido por ideas francesas, realizó obras públicas, como la remodelación de la Alameda de los Descalzos y la construcción de la plaza de Acho. En el periodo republicano, durante el gobierno del presidente José Balta (1868 – 1872), se vio la necesidad de contar con un espacio público, por esta razón se crea el Parque de la Exposición y de esta manera las áreas verdes se empiezan a integrar con la ciudad (Hamann 2011). En 1969 durante el gobierno

militar del general Juan Velazco Alvarado se crea el Servicio de Parques (SERPAR), mediante decreto ley N° 17528, como organismo público descentralizado del Ministerio de Vivienda, cuyo objetivo fue entre otros la construcción, equipamiento y mantenimiento de los parques metropolitanos, zonales, zoológicos y botánicos.

En la actualidad se cuenta con una escasa normativa relacionada con espacios públicos, por lo que las escasas normas que rigen están dispersas y esto dificulta su defensa; las leyes, decretos reglamentarios y normas de nivel provincial y distrital establecidos en Lima, regulan por separado y con distintos grados de profundidad algunos elementos del espacio público verde.

- Ley N° 26664, dicta disposiciones referidas a la administración de las áreas verdes de uso público y determina que las municipalidades tienen bajo su responsabilidad la conservación de áreas verdes de uso público, tales como plazas, parques, bermas, jardines, óvalos, entre otros.
- Ley N° 28611, Ley General del Ambiente que establece en el Artículo 23 que los gobiernos locales deben asegurar la preservación y la ampliación de las áreas verdes urbanas y periurbanas que dispone la población.
- Ordenanza N° 1852-MML para la conservación y gestión de las áreas verdes de la provincia de Lima.
- Ordenanza N° 525-MML crea el Sistema Metropolitano de Áreas Verdes de la provincia de Lima y, de esta manera, contribuir con la creación, conservación, protección, valoración, manejo, mantenimiento y sostenibilidad de las áreas verdes como elementos esenciales para la mejora de la calidad de vida de las personas y del ambiente en la ciudad.

En Lima-Callao existen 3 207 hectáreas de áreas verdes públicas, el 52 % corresponde a parques distritales, el 22 % parques lineales o bermas y el resto son áreas privadas. La disponibilidad de áreas verdes por habitante (m^2/hab) en los distritos de Lima es irregular, según indica IMP (2010), distritos como Comas e Independencia cuenta con 1.14 y 1.04 m^2/hab y distritos como San Isidro cuenta con 6.66 m^2/hab .

2.3. CALIDAD DE AIRE

El desarrollo de las ciudades conlleva a la generación de problemas ambientales, debido a la

alta presión antrópica generada a partir de las actividades económicas como la industria, el comercio, el tránsito vehicular, las cuales emiten diariamente altos volúmenes de contaminantes gaseosos a la atmósfera, modificando de esta manera su composición natural.

Por todas estas razones, monitorear la calidad del aire resulta importante y fundamental para brindar la información necesaria a la población, y de esta manera desarrollar estrategias de prevención, control y mitigación de emisiones (INECC 2017). La calidad del aire indica la presencia de contaminantes en el aire y por lo tanto no es apto para ser respirado pues, estar rodeado de una atmósfera contaminada implica riesgo o daño para la salud de las personas, los animales, las plantas y el medio ambiente. La contaminación del aire está relacionada con el aumento de la morbilidad y la mortalidad, principalmente debido a enfermedades cardiovasculares, cáncer de pulmón, infecciones respiratorias agudas y asma (Sánchez & Ordoñez 2016).

2.3.1. Composición del aire

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea a la tierra, con un espesor aproximado de 10 000 km, en ella se producen los fenómenos meteorológicos que inciden sobre la superficie terrestre, también controla el ingreso y salida de energía y temperatura (Ministerio del Medio Ambiente 2016). Por consiguiente, cualquier alteración sobre ella afectará a los seres vivos. Tuvieron que pasar millones de años para que la atmósfera permita el surgimiento de las primeras formas de vida productoras de oxígeno, desde entonces, la composición de la atmósfera cambió drásticamente hasta alcanzar su conformación actual (Wilches 2008). Los principales gases que conforman el aire son nitrógeno (78.08 %), oxígeno (20.95 %) y el 1% restante se compone por gases traza, como los gases de efecto invernadero (GEI), vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ozono (O₃) también se encuentran partículas (PM₁₀ y PM_{2.5}) (Contreras *et al.* 2013; Ministerio del Medio Ambiente 2016).

2.3.2. Contaminación atmosférica

Es un fenómeno originado por la presencia y acumulación de contaminantes en el aire, en niveles que constituyen riesgo en la salud de las personas, la conservación de la naturaleza y diversos materiales (Wilches 2008). IDEAM (2012), señala que la contaminación del aire surge inicialmente a partir de eventos naturales como las erupciones volcánicas, incendios forestales, seguidamente es el hombre que en su necesidad de utilizar fuentes de energía recurre a la combustión de vegetales. Durante la revolución industrial la demanda energética se incrementó súbitamente, por lo que se tuvo que recurrir a nuevas fuentes de energía como

el carbón, que fue considerado como el principal combustible debido a su lenta combustión y mayor poder energético. El empleo desmesurado de energía en las actividades humanas, elevó los niveles de contaminación de aire, generando cambios sustanciales en su composición y comportamiento (Wilches 2008).

Las actividades económicas junto al crecimiento poblacional, son factores que actualmente determinan el nivel de contaminación atmosférica, en tal sentido Alley & Associates (2000) señalan que la contaminación del aire es un fenómeno establecido en las ciudades, debido a que se ha superado la capacidad que tiene el aire para diluir los contaminantes. De esta manera: la población, el acelerado desarrollo industrial y la dependencia cada vez más a motores de combustión, contribuyen al incremento sostenido de emisiones gaseosas y sólidas a la atmósfera.

a. Combustibles fósiles

Actualmente el petróleo es la principal fuente de energía, impulsa la industria automovilística que constituye la principal fuente de contaminación atmosférica en todo el mundo. El uso progresivo y desmesurado de la energía a partir de combustibles fósiles, origina consecuencias que cada vez son más frecuentes e intensas, causando pérdidas humanas y económicas, a causa de ello, la humanidad actualmente enfrenta tres problemas ambientales: destrucción de la capa de ozono, acumulación de gases efecto invernadero y la dispersión de contaminantes en la tropósfera (Wilches 2008).

b. Parque automotor

En un estudio que desarrolló la CAF (2011) señaló que en América Latina para el año 2011 existían, 27 millones de vehículos de uso privado y 230 000 vehículos de uso público, por otro lado, Estupiñán (2018) menciona que, en 29 ciudades de América Latina entre el 2007 y 2014 la flota de automóviles creció de 24.7 a 35.2 millones, el cual representa un incremento promedio anual de 4.4 %. En ese entender, el sector transporte consume aproximadamente el 25 % de la demanda mundial de energía y cerca del 61 % del consumo anual de petróleo, haciendo de este sector, una fuente significativa de emisión de gases efecto invernadero, siendo responsable del 23 % de las emisiones de CO₂ (PPMC 2015). Los contaminantes derivados de combustibles fósiles son: el material particulado (MP), dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Defensoría del Pueblo 2005).

2.3.3. Material particulado

El material particulado (MP) de la atmósfera está compuesto por una mezcla de partículas sólidas y líquidas que, dependiendo de su fuente de emisión, presentarán diferente tamaño y composición química, dichas fuentes pueden ser naturales como; los bioaerosoles, aerosoles marinos y minerales o antropogénicos como la quema de biomasa, el parque automotor y las actividades industriales (Vallius 2005).

a. Clasificación del material particulado

El MP es una mezcla compleja de sustancias orgánicas e inorgánicas que varían en tamaño, composición y origen. En los estudios de calidad de aire, es clasificado en base a sus propiedades aerodinámicas, dichas propiedades dirigen el transporte y controlan el depósito de MP dentro del sistema respiratorio, estas propiedades están relacionadas con el diámetro aerodinámico el cual, es el diámetro de una esfera con las mismas características aerodinámicas que la partícula (EPA 1996; European Commission & WHO 2002). Por lo tanto, las partículas son muestreadas y descritas sobre la base de su “diámetro aerodinámico”, usualmente llamado “tamaño de partícula”. Dependiendo al tamaño de partícula, el MP es clasificado en cuatro parámetros; partículas suspendidas totales (PST), PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . Las PST son aquellas que presentan un tamaño de partícula menor a 40 o 50 μm , las PM_{10} tienen un tamaño de partícula menor a 10 μm , las $PM_{2.5}$ y PM_1 presentan un tamaño de partícula menor a 2.5 y 1 μm respectivamente (Seinfeld y Pandis 2006).

En base a la masa el MP puede clasificarse en partículas gruesas, aquellas mayores a 2.5 μm , partículas finas son aquellas comprendidas entre 0.1 y 2.5 μm y las ultrafinas presentan un diámetro menor 0.1 μm (EPA 1996), también dependiendo a su origen, se clasifica en:

partículas primarias si las partículas fueron emitidas directamente a la atmósfera (transporte) y partículas secundarias aquellas que se formaron en la atmósfera a partir de precursores gaseosos por condensación o coagulación (European Commission & WHO 2002).

b. Dinámica del material particulado en la atmósfera

El MP presenta un diámetro que varía desde unos nanómetros hasta varias micras, la EPA (1996) identificó diferentes rangos de tamaños de partícula conocidos como modas, relacionados mayormente al mecanismo de su formación y estas son; nucleación, aitken, acumulación y moda gruesa

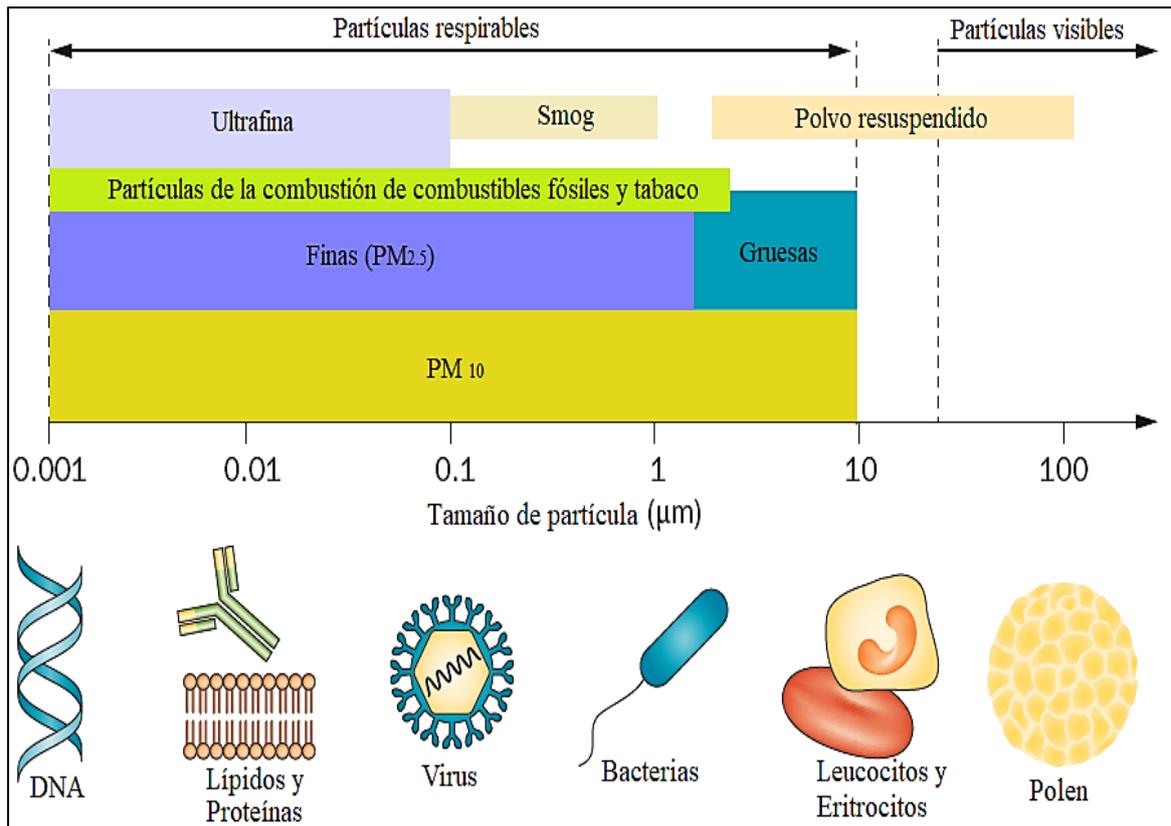


Figura 2.1: Clasificación de las partículas según su diámetro aerodinámico.

FUENTE: Cosselman *et al.* (2015).

La condensación del vapor proveniente de fuentes de combustión, dan origen a las partículas ultrafinas (menores a 0.02 micrómetros) en la atmósfera, mediante el movimiento Browniano, rápidamente se van uniendo entre ellas, esta aglomeración hace que la partícula aumente de tamaño. A este proceso se le conoce como nucleación y está favorecido por la humedad relativa, la temperatura y compuestos que contengan H₂SO₄ y NH₃, (Viana 2003). Seguidamente estas partículas por coagulación aumentan de tamaño hasta alcanzar un diámetro aproximado de 0.1 micrómetros, a este tamaño de partícula se conoce como moda Aitken, las partículas que componen esta moda, mediante reacciones ocurridas en las gotas de las nubes, crecen hasta alcanzar un diámetro de un micrómetro y de esta manera originan la moda de acumulación, esta moda presenta una alta densidad de partículas. El crecimiento de partículas tiene un límite máximo de un micrómetro (EPA 1996 y Viana 2003). La moda gruesa está compuesta por partículas que superan un micrómetro de diámetro y en su mayoría son de origen primario tales como la erosión de la superficie terrestre, el aerosol marino, granos de polen, etc. (Viana 2003).

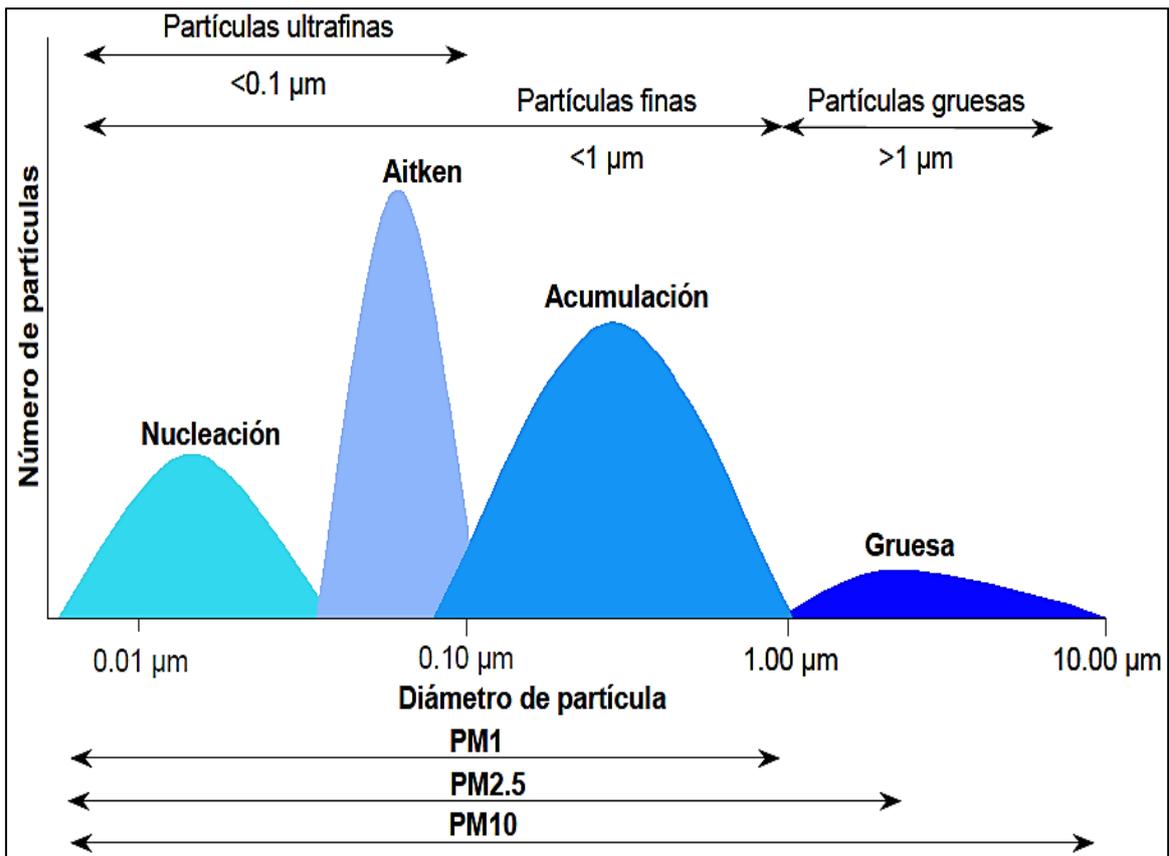


Figura 2.2: Distribución de partículas en función al diámetro.

FUENTE: EPA (1996)

c. Efectos del material particulado

- Efectos sobre la salud humana

La proporción de MP que es inhalado por el ser humano depende de las propiedades de las partículas, de la velocidad y dirección del aire y el ritmo respiratorio pudiendo ser exhaladas o depositarse en alguna parte del tracto respiratorio. El recorrido que han de seguir las partículas en el cuerpo, está constituido por la nariz, faringe, laringe, árbol traqueo-branquial, y alveolos pulmonares (Viana 2003).

La nariz constituye el primer filtro en el cual, el aire es calentado, humedecido y parcialmente desprovisto de partículas; la retención ocurre por impacto del MP con las paredes y luego sedimentan. La faringe y laringe continúan a las fosas nasales, en estas cavidades el material particulado es retenido en la mucosa y pueden ser eliminadas mediante la expectoración. A las partículas que quedaron retenidas entre las fosas nasales y la laringe se les conoce como fracción inhalable y está constituido por partículas menores a 100 micrómetros. Siguiendo a la laringe, se encuentra la tráquea y los bronquios, a nivel de estos

ductos la velocidad del aire va disminuyendo, por lo que las partículas pueden sedimentar o ser retenidas en las paredes ciliares y luego por expectoración ser eliminadas al exterior. A la fracción de partículas que son retenidas en estos lugares, se les conoce como la fracción torácica y generalmente son partículas comprendidas entre 10 a 2.5 micrómetros. Finalmente se encuentra la región alveolar, donde se lleva a cabo el intercambio gaseoso (hematosis), las partículas que lograron llegar a esta región, se depositan en las paredes alveolares y dependiendo a su solubilidad, pueden ser absorbidas por los tejidos causando enfermedades pulmonares y cardiovasculares, las insolubles causan enfermedades como la silicosis y asbestosis. A las partículas que llegaron hasta los alveolos, se les conoce como la fracción respirable y está conformada por partículas menores 2.5 micrómetros (EPA 2004).

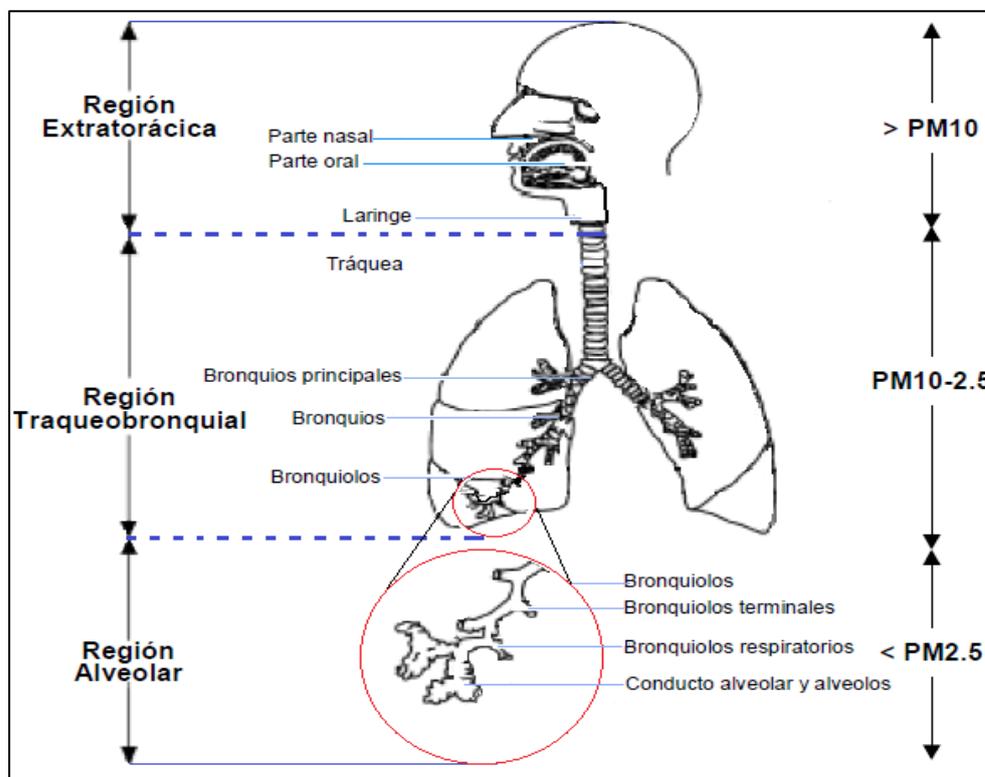


Figura 2.3: Distribución del material particulado en el aparato respiratorio.

FUENTE: EPA (2004)

- Efectos sobre el medio ambiente

El PM intercepta la radiación proveniente del sol, absorbiendo y dispersándola, por lo que una elevada concentración de PM, ocasionará que la cantidad de ondas de luz que logren impactar sobre la superficie terrestre, sea menor. A consecuencia de este fenómeno la claridad y el color será reducida. Partículas como los sulfatos, dispersan más luz que otras

partículas (EPA 2006). La dispersión hará que el planeta sea más reflexivo y el clima tienda a enfriarse, mientras que la absorción tiende a calentar el sistema. El equilibrio entre enfriamiento y calentamiento depende de las propiedades de los aerosoles y de las condiciones ambientales (Acero *et al.* 2014). Las partículas también actúan como centros de nucleación, aumentando la concentración de gotas muy pequeñas en las nubes e incrementado la reflexión de la radiación solar por parte de las nubes (albedo de las nubes). Esto resultará en un enfriamiento del clima pues menor será la radiación solar incidente y absorbida en la superficie terrestre (Wurzler *et al.* 2000).

En la Conferencia de Estocolmo en 1972, se habló por primera vez acerca de la lluvia ácida, el cual se refiere a la precipitación sea húmeda (lluvia, nieve y niebla) o seca (polvo o humo) con altos niveles de acides (pH inferior a 5.6) debido a la presencia de componentes ácidos como ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), estos se generan cuando el PM formado por dióxido de azufre (SO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), reaccionan con la humedad de la atmósfera. Esta precipitación genera efectos nocivos sobre los ecosistemas acidificando suelos, lagos y ríos poniendo en riesgo a plantas y animales (Garcés y Hernández 2004). Por otro lado, la lluvia ácida, también acelera la corrosión de edificios, estatuas y monumentos construidos con mármol o caliza (Ministerio del Medio Ambiente 2016).

Las plantas, son una superficie de deposición de las partículas, una mayor deposición de PM sobre las hojas, reducirá la capacidad de intercambio gaseoso, obstruyendo las estomas y consecuentemente la fotosíntesis también se verá afectada, pues los fotosistemas no recibirán la energía solar requerida (WBG 1999).

Las estructuras aéreas de las plantas especialmente las hojas, constituyen una importante superficie de retención de material particulado suspendido en la atmosfera. Nowak *et al.* (2014) demostraron que los árboles retienen cantidades significativas de contaminación produciendo importantes mejoras para la salud y beneficios económicos. Estas superficies, pueden retener temporalmente el material particulado pues tanto hojas, tallos y flores se desprenden periódicamente, por otro lado, los fenómenos atmosféricos como el viento y la precipitación resuspenden este material, retornando una vez más a la atmósfera o precipitando al suelo. La precipitación en la ciudad en Lima es reducida, por lo cual las hojas en los árboles urbanos suelen acumular MP.

2.3.4. Material particulado en la ciudad de Lima.

La contaminación del aire es uno de los principales problemas ambientales del Perú, MINAM (2012), señala que el parque automotor es la mayor fuente de contaminación del aire en el país y en los últimos años se ha evidenciado una relación directa entre el incremento de vehículos y la contaminación del aire. En el caso de la metrópoli Lima-Callao, las principales causas de este problema, son el deficiente sistema de transporte urbano con un parque automotor antiguo, la mala organización de rutas y la sobreoferta de taxis.

Según el informe nacional del estado del ambiente MINAM (2014a), entre el 2000 y el 2012 el número de unidades vehiculares en Lima aumentó de 100 a 149 unidades por cada 1000 habitantes (unid./1000 hab.), y según el SINIA (2016) esta proporción fue de 175 unid./1000 hab. Perú 21 (2017) en una entrevista a Eric Concepción Gamarra (ex responsable del Área de Gestión de la Calidad del Aire, Emisiones Atmosféricas y Ruido del Ministerio del Ambiente) señala que el parque vehicular y los combustibles contribuyen con el 70 % de la contaminación del aire. Estas emisiones vehiculares modifican la composición natural del aire y es el problema ambiental que silenciosamente viene causando daños en la salud pública, tal es así que en MINAM (2014c) estimó que, la morbilidad en Lima Metropolitana para el año 2014 fue de 1220 casos de muertes atribuibles a la contaminación por PM₁₀. Asimismo, se han estimado 1900 casos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias, 495 por enfermedades cardiovasculares y 1222 por ataques de asma en niños. El ranking mundial AirVisual (2018), ubicó a Lima en el puesto 22 con la mayor concentración de PM_{2.5} (28 µg/m³ media anual), siendo la segunda en América, y antecedido solo por Santiago de Chile (29.4 µg/m³). Existen otros factores que promueven la concentración del material particulado en la ciudad de Lima (Anexo 1).

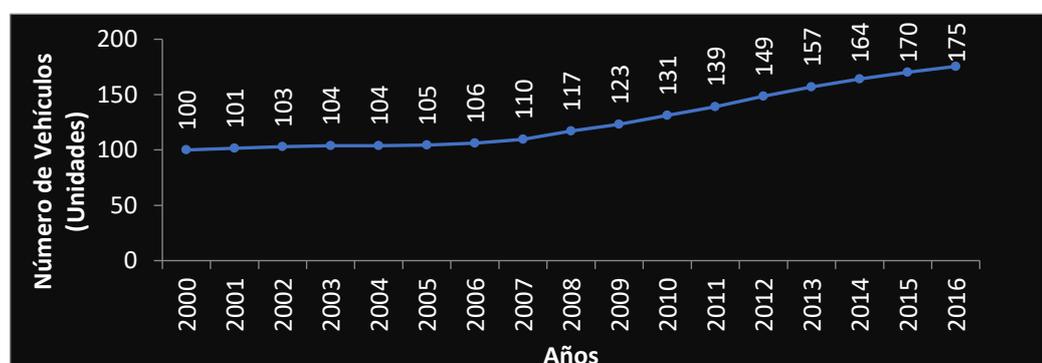


Figura 2.4: Unidades vehiculares por cada mil habitantes en la ciudad de Lima.

FUENTE: <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/966>

2.3.5. Estándares de calidad - Lima

El 2001 mediante el decreto supremo N° 074-2001-PCM, se publicó y aprobó el reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental (ECA) de aire, el cual es un instrumento de gestión ambiental para prevenir y planificar el control de la contaminación del aire. Los ECA de aire establecen los niveles de concentración de elementos o sustancias (parámetros) presentes en la atmosfera, que no representan riesgos para la salud ni el ambiente (MINAM 2011). Entre el 2001 y el 2017 se aprobaron diferentes decretos supremos que añadían nuevos parámetros y modificaban los estándares (D.S N° 069-2003-PCM, D.S N° 003-2008-MINAM, D.S N° 006-2013-MINAM) actualmente los ECA de aire vigente están señalados en el D.S N° 003-2017-MINAM.

El anuario de estadísticas ambientales INEI (2019), provee los datos del monitoreo de material particulado obtenido en las diferentes estaciones operadas por la Dirección General de Salud Ambiental (Figura 2.5). La información obtenida, señala que la concentración de material PM₁₀, entre el 2009 y 2018, excedió el estándar vigente (50 µg/m³ anual), pero en el Callao los valores de PM₁₀ se encuentran por debajo del ECA. En cuanto al material particulado PM_{2.5} en Lima y Callao, entre el 2008 y 2018, las estaciones a excepción de Lima-Este vienen mostrando un ligero descenso, pero aún se encuentran muy próximas a los valores que señala el ECA.

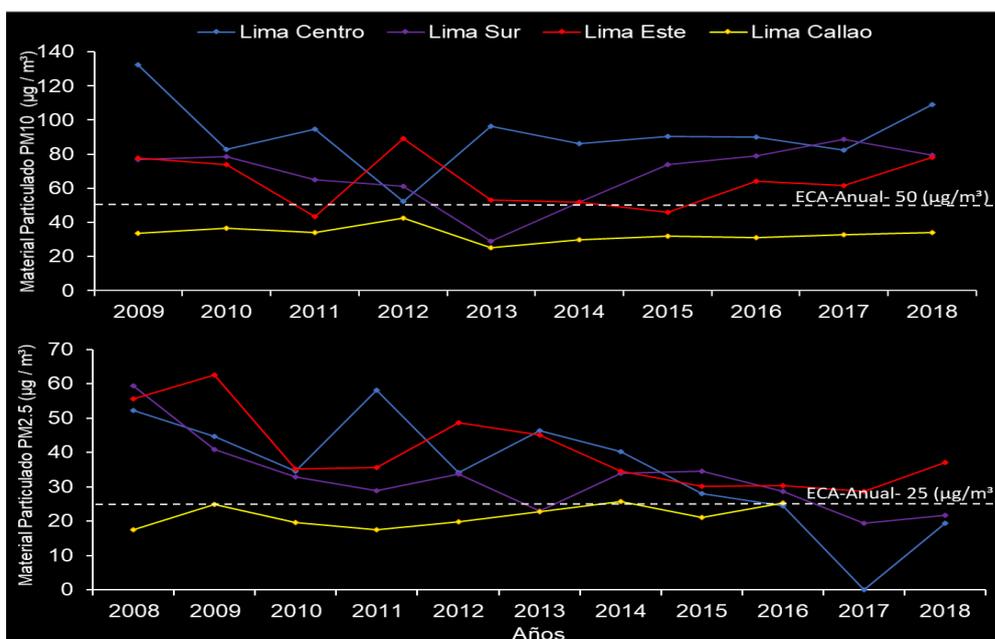


Figura 2.5: Comportamiento histórico del PM₁₀ y PM_{2.5} en la ciudad de Lima.

FUENTE: Estadísticas ambientales INEI (2019)

2.4. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SE)

En la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio se afirmó que, los servicios ecosistémicos son aquellos beneficios directos o indirectos que las personas obtienen de la naturaleza para satisfacer sus necesidades (MEA 2005). Satisfacer las necesidades de los hombres, así como su bienestar depende de un valor intrínseco de la naturaleza, en ese camino, su capacidad transformadora lo llevó a utilizar la naturaleza para moldearla de acuerdo a sus necesidades, pero que lamentablemente el aprovechamiento excesivo acabó degradándola. Bajo los conceptos de ecología profunda el hombre no debe considerarse dueño de la naturaleza ni utilizarla arbitrariamente, sino que debe administrar sus recursos naturales en un marco de respeto hacia el entorno que lo rodea y hacia las futuras generaciones que vivirán de ella (Pearlmutter *et al.* 2017).

2.4.1. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA)

El año 2000 la ONU convocó a más de 1000 investigadores de todas partes para evaluar el estado de los ecosistemas en el mundo, al cabo de cinco años concluyeron que las actividades humanas generan impactos significativos sobre los ecosistemas, reduciendo tanto su resiliencia como su capacidad de brindar servicios (PNUMA 2001). Dicha evaluación señala que cuatro servicios ecosistémicos mostraron un mejoramiento en los últimos 50 años, quince están en serio declive y cinco están en estado estable con algunas amenazas en algunas partes del mundo. También señala que existen indicadores que advierten que la demanda de servicios ecosistémicos, crecerá aún más en las décadas siguientes, debido al aumento en 3 mil millones de personas y un crecimiento de 400% de la economía mundial para el año 2050. Estas proyecciones también advierten que cada vez la presión de las actividades humanas (como la agricultura, la pesca, etc.) sobre los ecosistemas, será incesante.

2.4.2. Clasificación de los servicios ecosistémicos

La MEA clasifica a los SE en base al beneficio que el hombre obtiene a partir de ellos y los clasifica en:

- Servicios de suministro. - Son aquellos productos que son obtenidos directamente del ecosistema como alimento, agua, leña, etc.

- Servicios de regulación. - Son los beneficios obtenidos a partir de la regulación de los procesos del ecosistema como la regulación de la calidad del aire, la regulación de la temperatura, etc.
- Servicios de base. - Estos servicios son necesarios para la producción de todos los demás servicios ecosistémicos, tales como la formación de suelos, la fotosíntesis, etc.
- Servicios culturales. - Son aquellos beneficios no materiales que las personas obtienen de los ecosistemas, por ejemplo; la belleza escénica, la recreación, la identidad, etc.

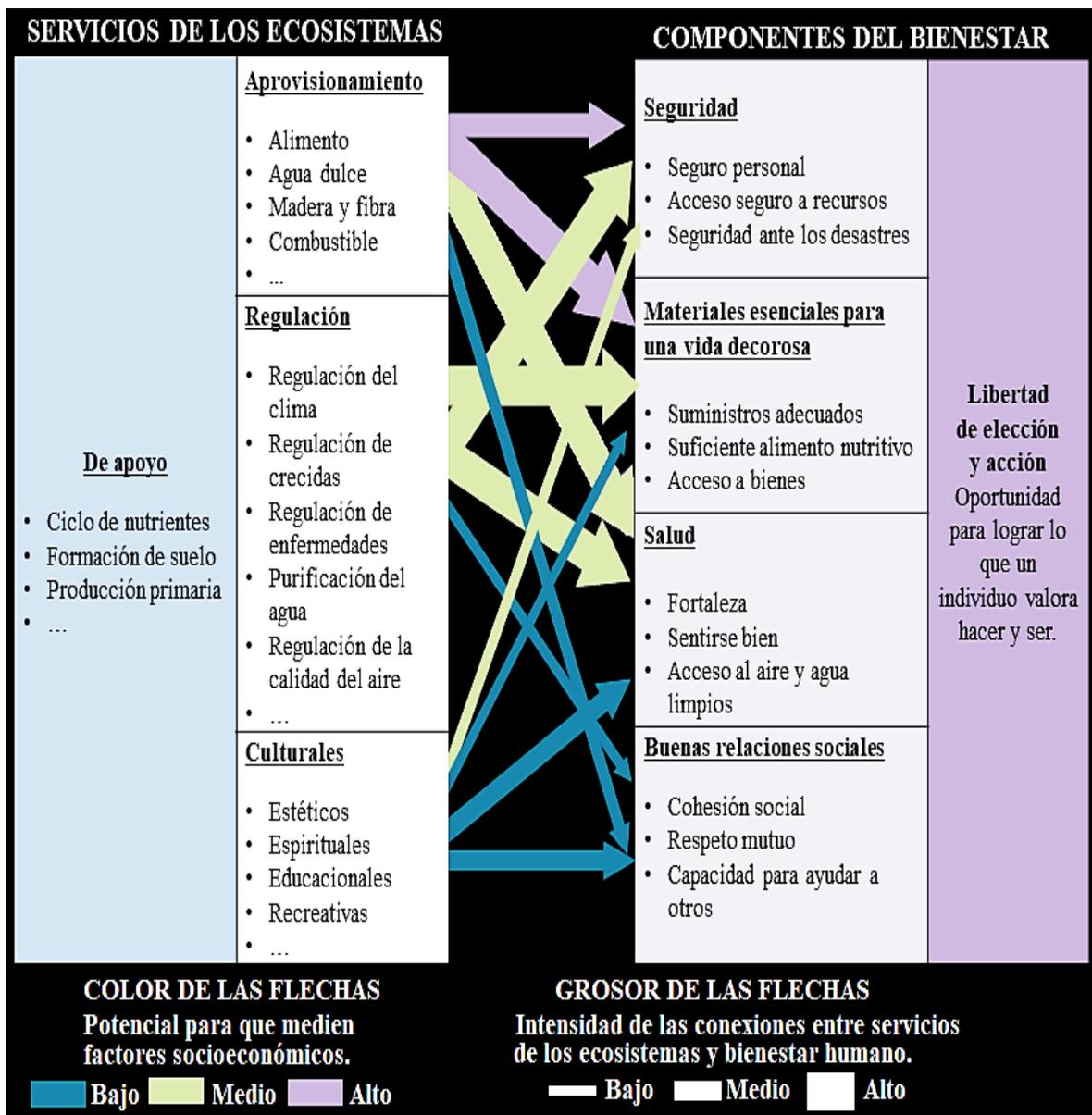


Figura 2.6: Clasificación de los servicios ecosistémicos.

FUENTE: MEA (2005)

2.4.3. Servicios ecosistémicos en áreas verdes urbanas

Pearlmutter *et al.* (2017) consideran que, a los paisajes modificados artificialmente como las ciudades, se les debe considerar como ecosistemas urbanos, estos difieren de los ecosistemas naturales por los flujos de energía y materiales promovidos por los humanos. En ese sentido, en el Cuadro 2.1 Szumacher y Malinowska (2013), mencionan los servicios ecosistémicos urbanos:

Cuadro 2.1: Servicios ecosistémicos en el ecosistema urbano.

SERVICIOS ECOSISTÉMICOS		Parques	Plazoletas y jardines	Panteones	Huertos parcelados	Bosques	Cultivos y jardinería	Prados y pastos	Aguas
Provisión	Producción de provisiones				X	X	X	X	X
	Materias primas				X	X	X	X	
	Aprovisionamiento de agua								X
Regulación	Regulación de la composición del aire	X	X	X	X	X		X	X
	Regulación del clima	X	X	X	X	X			X
	Regulación ambiental	X	X	X	X	X			X
	Regulación de fenómenos extremos					X		X	
	Regulación de procesos de los suelos	X			X	X	X	X	
	Regulación de residuos y autodepuración	X	X	X	X	X			
Soport	Circulación de elementos	X		X	X	X	X	X	
	Función habitacional	X		X	X	X	X	X	
	Ciclo hidrológico	X	X	X	X	X	X	X	X
Culturales	Funciones estéticas	X	X	X	X	X		X	X
	Recreativas	X	X		X	X		X	X
	Recursos culturales y artísticos	X	X	X	X	X			
	Funciones espirituales	X		X		X			X
	Ciencia y educación	X	X	X	X	X	X	X	X

FUENTE: Szumacher & Malinowska (2013).

2.4.4. Servicios ecosistémicos de los árboles en una ciudad

Pearlmutter *et al.* (2017), resaltan la gran importancia que tienen los árboles en las ciudades; siendo su excepcional envergadura, los servicios ecosistémicos que brindan y el vínculo espiritual con el hombre las características por las que, son considerados como ingenieros ambientales, pues su presencia modifica el espacio en el que se encuentran Priego (2002).

Con respecto a los servicios ecosistémicos que ofrecen, Casanoves *et al.* (2011) señalan que, la eficiencia en la provisión de estos, depende de distintas características estructurales, funcionales y biológicas (caracteres funcionales) que presentan las diferentes especies, por lo que algunas proveerán de manera más eficiente un determinado servicio ecosistémico. Entre los servicios ecosistémicos que ofrecen se encuentran, el secuestro de CO₂, regulación del microclima, retención de contaminantes atmosféricos, servicios de hábitat para la fauna, especialmente aves, etc., (Figura 2.7).

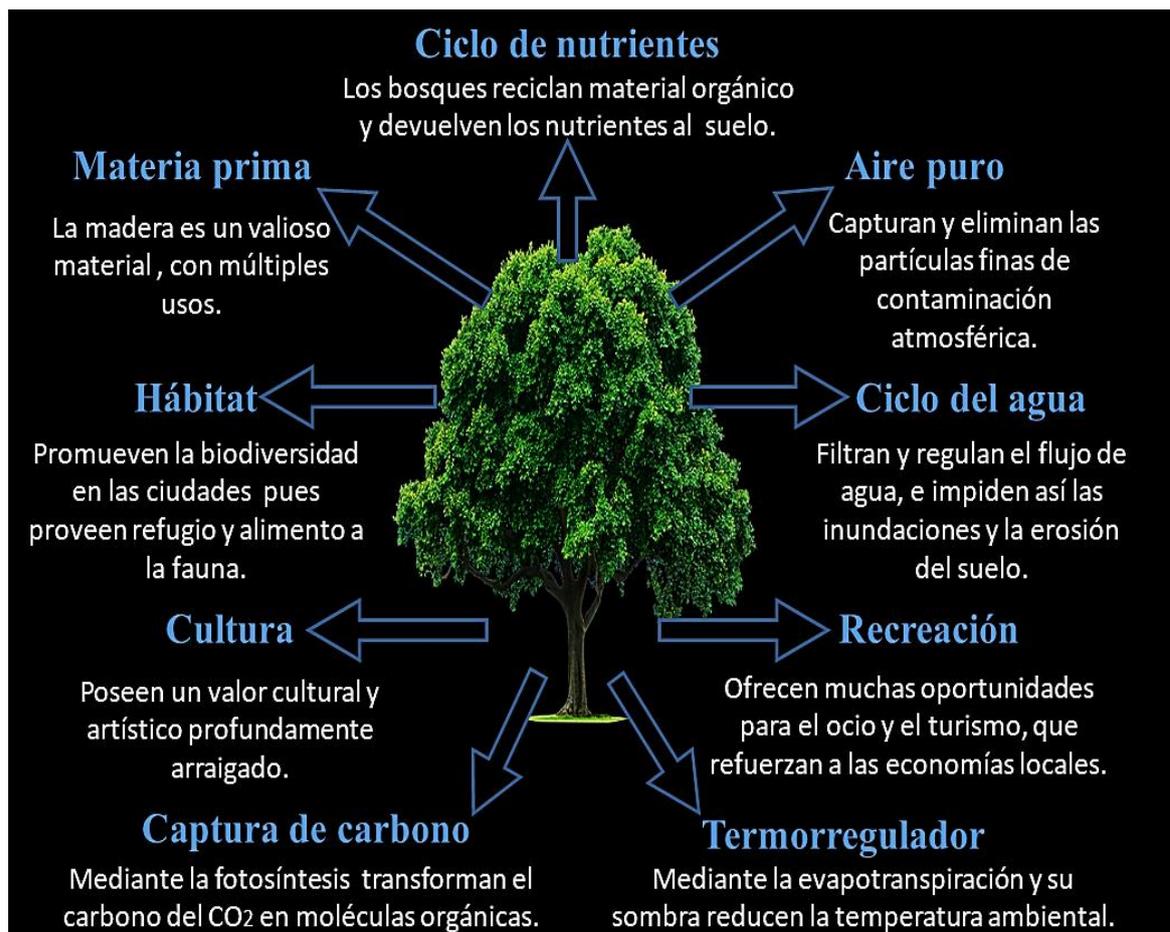


Figura 2.7: Servicios ecosistémicos proveídos por los árboles en una ciudad.

FUENTE: Elaboración propia

2.5. CARACTERES FUNCIONALES

Son aquellos atributos morfológicos, fisiológicos y fenológicos de las plantas que determinan sus estrategias ecológicas y respuestas a diferentes condiciones ambientales y de esta manera modifican las propiedades de los ecosistemas (Pérez *et al.* 2013). Caracteres como el tamaño de la planta, la densidad de la madera y la longevidad de las hojas están relacionados con la captura de carbono y de esta manera las plantas intervienen en la regulación de la calidad del aire. Por otro lado, la estructura de la hoja y dosel, están relacionados con la evapotranspiración, regulando así la temperatura ambiental y el efecto de islas de calor de las ciudades (Díaz *et al.* 2006).

2.5.1. Caracteres de tallos

a. Diámetro a la altura del pecho (DAP)

El crecimiento secundario es el aumento del perímetro del tallo y la raíz de los árboles, que se origina a partir de la división celular de los meristemos laterales, cambium vascular y cambium suberógeno (León 2001). El diámetro del tallo es un parámetro muy importante y utilizado en la evaluación forestal pues junto a otros parámetros permiten realizar estimaciones, por ejemplo, de área basal y biomasa (Chave *et al.* 2014). El monitoreo sostenible del DAP permite diferenciar a las especies de rápido y lento crecimiento.

b. Densidad de madera

La densidad brinda; la fuerza estructural que un árbol necesita para mantenerse en forma vertical y la durabilidad para vivir por mucho tiempo (Proyecto Madidi *et al.* 2012). La densidad está relacionada con las fibras, vasos, parénquima axial y la presencia de floema, por lo que cada especie tendrá un valor de densidad dependiendo a su anatomía (León 2010). La densidad (árbol vivo) es el peso seco de una sección de madera, dividido por su volumen (medido al momento de su colecta) y se expresa en g/cm^3 (Fearnside 1996). La combinación de la densidad, la altura y diámetro, permiten estimar el carbono almacenado en cada individuo arbóreo.

c. Altura del tallo

La elongación del tallo se debe principalmente al meristemo primario caulinar el cual está conformado por células que están en una mitosis constante y el crecimiento lateral se debe a los meristemos secundarios como el cambium vascular y el felodermo (Costa y Plumed 2016). Dependiendo a la forma, propiedades mecánicas, adaptación a la zona, longevidad

promedio, entre otros, los tallos, alcanzarán diferentes alturas y en combinación con otros caracteres funcionales, como el DAP, proveerán los SE como por ejemplo la captura de carbono (Gartner 1995).

d. Contenido de carbono

Las plantas junto a otros microorganismos, son los únicos seres vivos capaces de tomar el CO₂ de la atmósfera y convertirlo en moléculas orgánicas, esta capacidad inherente a los seres autótrofos, hace de ellos imprescindibles en el ciclo del carbono. El carbono una vez fijado en el interior de las plantas, participará junto a otros elementos en diferentes procesos metabólicos. El 95 % del cuerpo de los seres vivos se compone de solo cuatro elementos, el oxígeno, carbono, hidrógeno y nitrógeno, de ellos el carbono es el más importante por constituir biomoléculas como carbohidratos, proteínas, entre otros (ABC.es 2008). El contenido de carbono en las plantas, dependerá de la especie y según señala Stephenson *et al.* (2014) los árboles grandes y viejos no actúan como simples depósitos senescentes de carbono, por el contrario, fijan activamente grandes cantidades de carbono en comparación a los árboles pequeños.

2.5.2. Caracteres de hoja

a. Área foliar (AF)

Es la medida más frecuente para estimar el tamaño de hoja, Pérez *et al.* (2013) señalan que las variaciones climáticas, latitudinales y longitudinales están relacionadas con la variación del AF. También mencionan que el estrés por temperatura, sequías, nutrientes y altas radiaciones, hace que las especies respondan generando hojas relativamente pequeñas. Proyecto Madidi (2012) mencionan que, a partir del AF dependerá la energía y el balance de agua en la hoja.

b. Área foliar específica (AFE)

El AFE es un parámetro cuantitativo que se obtiene a partir de la división del área de una hoja fresca (mm²) entre su peso seco (mg), comúnmente es utilizado en los análisis de crecimiento debido a que se relaciona de manera positiva con la tasa fotosintética y con el contenido de nitrógeno en la hoja pero con la longevidad de la hoja se relaciona negativamente (Pérez *et al.* 2013), mencionan también que, ambientes ricos en nutrientes muestran en promedio altos valores de AFE, en comparación con lugares pobres en nutrientes. Proyecto Madidi (2012) indica que un alto valor de AFE señala que la hoja es

delgada, con un periodo de vida corto y una tasa metabólica por unidad de masa más alta.

c. Grosor de hoja

Pérez *et al.* (2013) señalan que este rasgo está relacionado con la resistencia física que ofrece la hoja frente a una fuerza externa que intente romperla, de esta manera la hoja cumple con la teoría de la optimización, la cual, es el balance entre los beneficios fotosintéticos con el costo de carbono utilizado durante la respiración y transpiración, por tal razón en ambientes soleados y secos el grosor de hoja será más alto. También señalan que, dentro de un mismo individuo, el grosor de hojas varía entre las hojas que están expuestas a la radiación (hojas gruesas) y hojas que se encuentran en el interior de la copa (hojas delgadas), el grosor y el número de capas del mesófilo, es el parámetro anatómico que explica la variación del grosor en las hojas.

d. Longitud de peciolo

Pasini y Mirjalili, (2006) mencionan que el peciolo es un pequeño tallo que une la lámina foliar al tallo principal, facilitando el paso del sistema vascular, también confiere cierta rigidez a la flexión de la hoja, resistiendo a fuerzas como, el peso de la propia lámina foliar, las gotas de lluvia, la humedad, la torsión generada por la fuerza aerodinámica del viento, para ello presenta un estrechamiento longitudinal y con frecuencia tiene una sección transversal asimétrica, acanalada en su parte superior, esta característica favorece la flexibilidad, permitiendo que las hojas desarrollen un ligero movimiento giratorio. Vélez (2010) menciona que, dependiendo de las especies, las hojas presentarán un peciolo alargado o corto y generalmente en las hojas compuestas presentarán un engrosamiento en el extremo que se une al tallo, dicha estructura tiene el nombre de pulvínulo y por variaciones en la turgencia de sus tejidos, favorece el movimiento de la hoja.

e. Venación rugosidad de la lámina foliar

La superficie foliar es una característica muy versátil entre las diferentes especies, debido a la longitud y densidad de las venas y a la presencia de microestructuras como tricomas, ceras, estomas, etc., las cuales constituyen los mecanismos de adaptación de las especies a su medio, este carácter funcional determina los procesos ecológicos y biológicos de las plantas, por ejemplo, la capacidad de adsorción de partículas suspendidas y la tasa fotosintética respectivamente (Bediaf *et al.* 2015).

f. Densidad de estomas

Son canales de comunicación y de intercambio gaseoso, formada por dos células arriñonadas a las cuales se les conoce como células oclusivas. La posición y densidad en las hojas, varía entre el haz y el envés, denominándose hojas epiestomáticas a aquellas que presentan estomas solo en el haz, hipoestomáticas a aquellas que presentan estomas solo en el envés y anfiestomáticas a aquellas hojas que presentan estomas en ambas superficies (Flores 1999).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Ubicación del área de estudio

El presente estudio se realizó en el campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), ubicada en el distrito de San Miguel, provincia de Lima, en las coordenadas UTM 18L 273606 m E, 8664858 m S, 72 m de altitud. El campus de la PUCP tiene un área de 41.3 ha, de las cuales 18.4 ha son áreas verdes y 1.85 ha están destinadas a espacios deportivos. Es una zona de clima árido, con escasa precipitación en todas las estaciones, su temperatura es semicálida y húmeda. Normalmente los vientos provienen del sur, considerándose una zona con alta ventosidad, llegando a alcanzar una velocidad entre 8 a 12 m/s. Aproximadamente son 23.000 personas diarias, entre estudiantes, profesores, visitantes y administrativos que se encuentran en el campus. EDU (2015) menciona que más de 3 mil individuos arbóreos son administrados por el área de gestión ambiental y jardines (OSG-DAF-PUCP).

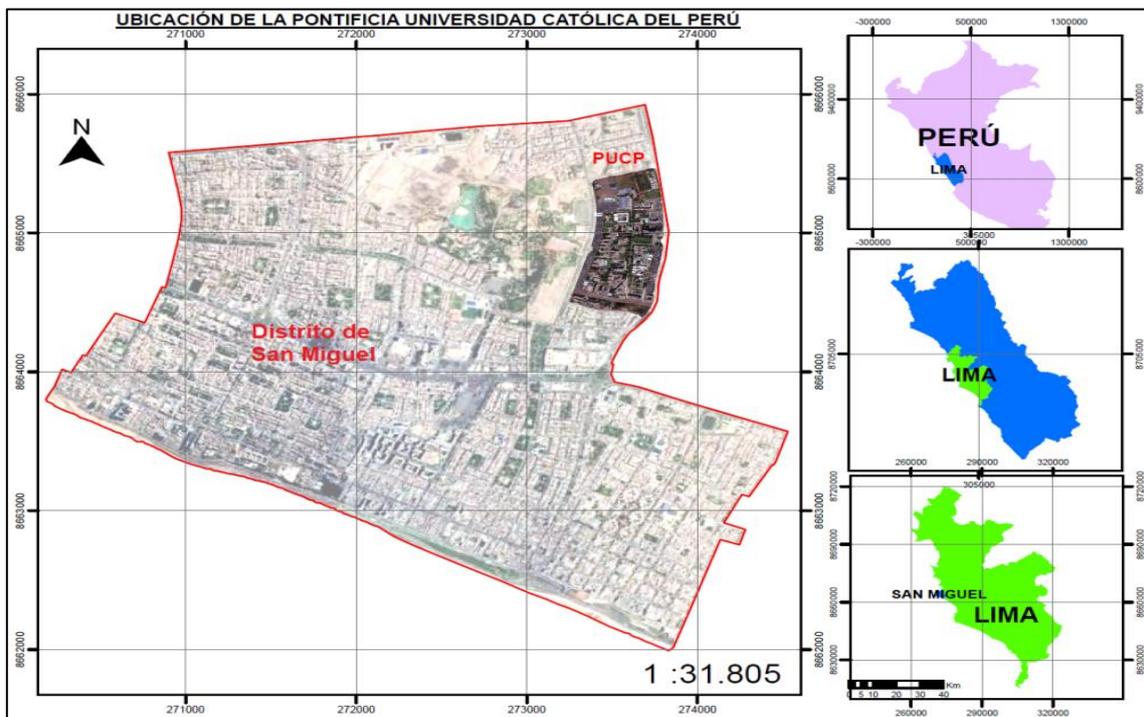


Figura 3.1: Mapa de ubicación que muestra el área de estudio (PUCP).

3.1.2. Materiales de laboratorio

- Placas petri
- Membrana pm2,5
- Papel filtro whatman 42
- Matraz erlenmeyer de 1000 ml
- Matraz kitasato 1000 ml
- Embudos büchner 70mm diámetro
- Tapón horadado
- Pinceles gruesos
- Recipientes de vidrios
- Papel toalla
- Bandejas de vidrio
- Bolsas de papel-20x30 cm
- Cintas diamétricas
- Calibradores
- Alcohol isopropílico
- Tijeras podadoras
- Colectas botánicas
- Agua destilada
- Vaselina
- Agua desionizada
- Barniz de uñas
- Soportes pvc

3.1.3. Instrumentos y equipos

- Cámara fotográfica
- Microscopio compuesto
- Estereomicroscopio leica mc50
- Bomba de succión
- Escáner de área foliar
- Micrómetro electrónico
- Balanza analítica
- Horno de calor seco
- Computadoras
- Binoculares

3.2. MÉTODOS

Inicialmente se desarrolló el registro de las especies arbóreas que se encuentran dentro del área de estudio, simultáneamente se fueron obteniendo datos dasométricos de cada uno de los individuos arbóreos. A partir del registro general y considerando su abundancia, se eligieron 30 individuos pertenecientes a 10 especies más comunes. Sobre estos individuos seleccionados, se aplicaron mediciones y metodologías estandarizadas para cuantificar la retención de material particulado. Seguidamente se realizó el trabajo de laboratorio donde se efectuaron diferentes mediciones, finalmente se procesó y analizó la información obtenida.

3.2.1. Registro general de individuos arbóreos

Entre agosto de 2017 y marzo de 2018, se desarrolló el inventario florístico de todos los individuos arbóreos presentes en el campus de la PUCP. Se registraron árboles y palmeras, considerando todos los individuos que presentaron un diámetro del tronco \geq a 10 cm a 1.3

m de altura (DAP). Algunos individuos presentaron ramas por debajo del DAP mencionado, en este caso, si estas ramas tenían el diámetro considerado, se incluían en el inventario y se registraban como rama.

3.2.2. Variables dasométricas

a. Diámetro del tallo

La medición del diámetro del tallo, se desarrolló siguiendo los procedimientos y recomendaciones presentadas en el manual RAINFOR (Phillips *et al.* 2016). Este manual establece que el DAP se mide a 1.3 m de altura, también enseñan los procedimientos alternativos en caso de que el tronco presente deformaciones y no permita tomar la medida a la altura recomendada.

b. Altura total

Para medir la altura total de los árboles se utilizó un hipsómetro, TruPulse 360B Laser, el cual tiene una precisión de 0.2 m. El funcionamiento de este instrumento se basa en realizar una triangulación a partir de dos disparos de láser, el primer disparo se dirige hacia la base del tallo y el segundo hacia el ápice terminal del tallo.

c. Densidad de madera

La densidad de madera fue obtenida a partir de la división de la masa seca (gr) entre el volumen (cm³) Para ello se utilizó la metodología propuesta por Chave (2002) quien sugiere que, el método más adecuado para medir el volumen fresco, es el de desplazamiento de agua. Para obtener la masa seca, la muestra fue colocada en un horno seco a 105 °C por 24 horas (Wiemann y Williamson 1989).

3.2.3. Geolocalización de individuos arbóreos

Utilizando un receptor *GPS* Garmin *MAP 64sc*, se procedió con la geolocalización de cada uno de los individuos arbóreos. Esta información se visualizó en un *software* de Sistema de Información Geográfica (*ArcGIS* 10.3), donde fueron integrados a una imagen satelital de alta resolución adquirida del satélite WorldView3-VNIR, el 23 de enero de 2019 con una resolución de 35 cm y proveída por el Departamento de Biología de la universidad de Wake Forest- Carolina del Norte-Estados Unidos de Norteamérica.

3.2.4. Determinación de las muestras botánicas

Para la determinación taxonómica se utilizó bibliografía especializada, así como también, se consultaron herbarios virtuales como iPLAN Collaborative, NEOTRÓPICOS y ATRIUM. Seguidamente todos los individuos fueron organizados en una base de datos en base a su familia, género y especie.

a. Composición

Para conocer la composición de especies se procedió primero a excluir de la base de datos general todos aquellos tallos que fueron considerados como ramas, para así trabajar únicamente con individuos. Las categorías taxonómicas fueron dispuestas en base a las últimas actualizaciones de la Angiosperm Phylogeny Group.

b. Estructura

- **Estructura horizontal.** - Esta fue expresada en términos de área basal, para el cual fue necesario calcular la superficie de la sección transversal de cada uno de los árboles, aplicando la ecuación propuesta por Cerón (2003).

$$C = \frac{X_{max} - X_{min}}{m}$$

$$m = 1 + 3.3 \log N$$

Dónde: C= amplitud, Xmax= Dato máximo, N= N° de individuos y Xmin= Dato mínimo

En base a la regla de Sturges (Rangel y Velásquez 1997), se construyó una tabla de distribución de frecuencias de datos agrupados.

$$AB = \frac{\pi(DAP)^2}{4}$$

Dónde: DAP es el diámetro a la altura del pecho.

- **Estructura vertical.** - Fue analizada en base a la altura de los árboles (m) para lo cual, se elaboró una tabla de distribución de frecuencias de datos agrupados en base a la regla de Sturges.

3.2.5. Estimación de la reserva de biomasa

La biomasa fue estimada para cada uno de los individuos arbóreos, la ecuación utilizada estuvo en función al diámetro a la altura del pecho (*dap*), la densidad de madera (ρ) y la altura (*h*). Siguiendo un modelo alométrico formulado para árboles urbanos de hoja ancha, el cual considera la edad del árbol, el diámetro y volumen de la copa, así como también la zona climática, la condición y ubicación del árbol (McPherson *et al.* 2016).

$$V = 0.0001967 \times dap^{1.951853} \times h^{0.664245}$$

Dónde: *V*, es el volumen de madera fresca (m^3); *dap* (cm) es el diámetro del tronco a 1.3 m y *h* (m) es la altura total del árbol.

Seguidamente convertimos el volumen de madera fresca (*V*) en biomasa en peso seco (*DW biomass*) de esta manera se obtiene la biomasa aérea en m^3 .

$$DWbiomass = V \times DWdensity$$

Dónde: *DWdensity* es la densidad específica de madera seca (kg/m^3).

La densidad específica de madera seca (*DW density*) para cada especie, se obtuvo a partir de *Global Wood Density Database*. Para las especies que no estuvieron registradas en esta base de datos, se utilizó la media global a nivel de especie ($0.62 g/cm^3$).

Para estimar la biomasa aérea almacenada en las palmeras, se utilizó la ecuación de McPherson *et al.* (2016), quienes desarrollaron una ecuación alométrica para palmeras en las ciudades a partir de la ecuación de Frangi y Lugo (1985).

$$Biomasa\ de\ carbono = ((6 \times h + 0.8) + (0.8 \times h + 0.9)) \times 0.5$$

Dónde: *h* (m) es la altura total de la palmera.

Debido a la incertidumbre y al escaso conocimiento sobre la aplicación de una adecuada ecuación general para la estimación de biomasa en árboles urbanos en zonas tropicales, se vio por conveniente el empleo de una segunda ecuación alométrica, recomendada por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (McPherson *et al.* 2016), formulada por Chave *et al.* (2005) para bosques secos.

$$DW \text{ biomass} = 0.112 \times ((DW \text{ density}/1000) \times dap^2 \times h)^{0.916}$$

Donde, *DW density* es la densidad específica de madera seca (kg/m^3), *dap* es el diámetro del tronco a 1.3 m (cm) y *h* es la altura total del árbol (m).

A partir de la biomasa aérea estimada, se determinó la fracción de carbono (CF), la cual según el IPCC (2006) señala que la proporción de carbono en la biomasa, se encuentra en el rango de 43 a 58 % y lo más adecuado es asumir un 50 %, para ello se multiplica la biomasa por 0.5 (McPherson *et al.* 2016).

$$\text{Biomasa de carbono (kg)} = DW \text{ biomass} \times 0.5$$

3.2.6. Cuantificación del material particulado (MP) retenido

A partir del inventario general de los árboles de la PUCP, se eligieron 10 especies, siendo el área basal y el número de individuos los criterios de selección. Siguiendo la metodología (Alcalá *et al.* 2008; Chen *et al.* 2017) se seleccionaron 3 individuos por especie, tomando en cuenta su distribución espacial dentro del campus universitario y el buen estado de su ramificación y follaje.

a. Colecta de material biológico

Para cuantificar el MP retenido por las hojas se procedió inicialmente a coleccionar una rama de aproximadamente 1.5 cm de diámetro entre 1.5 y 3 m de altura con respecto al suelo, la rama elegida fue tomada del lado expuesto al sur, seguidamente se contaron y retiraron todas las hojas. Aquellas hojas que presentaron algún daño mecánico o herbivoría, una vez consideradas en el conteo, fueron desechadas. A partir de las hojas en buen estado y siguiendo el método de Alcalá *et al.* (2008) se tomó con mucho cuidado una muestra de 50 y 150 gramos de hojas, esta muestra debidamente codificada, fue colocada en un envase de vidrio con tapa hermética.

b. Extracción de material particulado de las hojas

Se separaron los peciolos de las hojas pertenecientes a la muestra, seguidamente cada una fue lavada con agua desionizada y mediante un pincel se facilitó el desprendimiento de las partículas presentes en el haz y envés (Dalmasso *et al.* 1997). El extracto obtenido fue depositado en un matraz rotulado y almacenado a 5 °C para su posterior filtración.

c. Filtración del extracto

Se utilizó un filtro de celulosa Whatman #42 y una membrana de teflón PTFE de 6.5 y 4.6 cm de diámetro respectivamente. El filtro como la membrana antes de su uso, fueron secadas en un horno a 60 °C por 30 minutos luego enfriadas por 30 minutos en una cámara de desecación con sílica, seguidamente se pesaron en una balanza analítica Sartorius BP110S, luego se registró el peso inicial (PF1) de cada uno de los filtros y finalmente fueron guardados en un recipiente con tapa hermética (Dzierżanowski *et al.* 2011). Seguidamente se preparó el sistema de filtración, para ello se montó un embudo Büchner de 7 cm de diámetro en un matraz Kitasato de un litro y conectado a una bomba de vacío, para facilitar la filtración.

El filtrado se inició con el filtro de celulosa Whatman #42, el mismo que tiene una apertura de poro de 2.5 micras y una retención del 98 %. Para el segundo filtrado, previamente se tuvo que reducir la tensión superficial de la membrana de PTFE (naturaleza hidrofóbica), para ello antes de la filtración, se colocaron unas gotas de alcohol isopropílico sobre la membrana (Dzierżanowski *et al.* 2011). La apertura de poro de esta membrana fue de 0.3 micras de diámetro. Una vez concluidas las filtraciones, filtros y membranas, fueron colocados en un horno a 60 °C por 30 minutos (Dzierżanowski *et al.* 2011), luego trasladados a una cámara de desecación por 30 minutos, seguidamente fueron pesados (PF2) y finalmente se calculó el MP presente en cada uno de los filtros mediante la diferencia de pesos y los resultados se expresaron en gr/m^2 de área foliar.

Para conocer si la presencia de MP en la atmosfera del campus de la PUCP es homogénea o está relacionada con alguna actividad antrópica o proceso natural que emita MP dentro o fuera del campus, se construyó un gráfico de isolíneas de cantidad de MP retenido con el *software ArcGIS 10.3*, para ello se utilizó los resultados del MP retenido en las hojas de los 30 individuos muestreados.

3.2.7. Cuantificación de Partículas Sólidas Sedimentables (PTSE) - Placas

Receptoras

Conocer la cantidad de PTSe en el área de estudio permitió conocer el estado de la atmósfera del lugar, para ello se instalaron placas receptoras (placas Petri) de 9 cm de diámetro, el interior de estas fue untada uniformemente con vaselina y luego pesadas en una balanza analítica Sartorius BP110S así se obtuvo el peso inicial (SENAMHI 2008a y Vizcarra 2006).

Se utilizaron 30 placas receptoras las cuales fueron sujetadas en soportes de 0.5 metros y luego colocadas en 3 azoteas de aproximadamente 10 metros de altura. Las placas estuvieron expuestas a la intemperie por un periodo de 30 días, a partir del 02 de octubre al 31 de octubre. Pasado este tiempo, fueron recolectadas y pesadas por segunda vez, y por diferencia de pesos se obtuvo el peso de partículas suspendidas totales capturadas en las placas receptoras. Los resultados fueron expresados en términos de peso de partículas suspendidas totales (gr) por área (cm²). Así mismo fueron confrontados con el índice establecido por la Organización Mundial de la Salud (0.5 mg/cm².mes).

Para tener un amplio panorama sobre la concentración y el comportamiento temporal de PM_{2.5} y PM₁₀ en el área de estudio, se analizó la data proveída por la estación meteorológica del Campo de Marte, ubicada en el distrito de Jesús María a 4 km de la PUCP. Esta estación pertenece a una de las 10 estaciones vigiladas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

3.2.8. Cuantificación de caracteres funcionales

La cuantificación de los diferentes caracteres funcionales, se realizó a partir de muestras que pertenecían a individuos de las 10 especies seleccionadas.

a. Grosor de hojas

Se procedió a medir el grosor de cada una de las hojas, utilizando un micrómetro electrónico IP54 con una resolución de 0.001 mm, para ello se ubicó un punto central en el lado derecho de la vena media evitando tomar la medida sobre alguna vena.

b. Área foliar

El área foliar fue calculada utilizando un medidor de área foliar láser portátil CI-202, en base a las observaciones hechas por Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013), quienes analizan la exclusión o inclusión del peciolo en las mediciones de área foliar específica, se decidió no incluir los peciolos en las mediciones respectivas pues el objetivo está relacionado a la interceptación de material particulado sobre la lámina foliar.

c. Peso seco

Una vez realizadas las mediciones, las hojas fueron depositadas en bolsas de papel debidamente codificadas para ser secadas a 65 °C por 48 horas Dalmaso *et al.* (1997), luego

fueron enfriadas por 30 minutos en una cámara hermética con sílica, para finalmente ser pesadas en una balanza analítica (Sartorius BP110S) de 0.1 mg de precisión. Dividiendo el área foliar entre el peso seco, se calculó el área foliar específica.

d. Longitud de peciolo

Utilizando un calibrador, se midió la longitud (mm) de los peciolo, obtenidos a partir de todas las hojas muestreadas.

e. Venación y rugosidad

Utilizando un sacabocado rectangular de 210 mm² se obtuvo una pequeña muestra de hoja, la cual fue tomada de la parte central del lado derecho de la vena media. La muestra fue montada sobre un estereomicroscopio Leica M165C y enfocada utilizando luz transmitida, luego se procedió a tomar una primera fotografía, utilizando una cámara Leica MC190HD incorporada al estereomicroscopio con una resolución de 300 ppp y un campo de 3648 x 2736 pixeles. Utilizando el software ImageJ (Gonzales 2018) se estimó el porcentaje de área que ocupaban las venas en la imagen tomada.

Seguidamente se procedió a tomar una segunda fotografía, para ello se elevó el aumento hasta una resolución de 4323 ppp, el área fotografiada fue de 0.0432 mm². Sobre esta imagen se aplicó el complemento *Plot Profile* del software ImageJ (Ferreira 2010). Este complemento muestra un gráfico bidimensional de las intensidades de pixeles (valor gris) de una superficie, a lo largo de una línea. En el eje “x” se representa la distancia y en el eje “y” se ubica la intensidad del pixel. Los valores altos de intensidad de pixel fueron llamados *picos* y los valores bajos *valles*, a partir de estos valores se obtuvo el coeficiente de variabilidad (CV), el cual indica el porcentaje de dispersión de los valores, a mayor CV los datos indicarán que la superficie que representan, es rugosa y caso contrario indicarán que la superficie es lisa.

f. Densidad de estomas

Utilizando la técnica de impresión de la superficie epidérmica en acetona (Carrillo *et al.* 2014), se procedieron a untar acetona (barniz de uñas) al haz y envés de la hoja, se secó por 5 minutos, así se obtuvieron películas transparentes de 2 cm² aproximadamente, estas

películas fueron montadas en un porta objetos y observadas al microscopio con un objetivo y ocular de 10X. Este procedimiento se realizó en 5 hojas para cada una de las 10 especies elegidas. Una vez enfocadas se procedió a fotografiarlas utilizando una cámara Leica MC190HD incorporada al microscopio. El área de la imagen fotografiada fue de 0.0432 mm², utilizando el software *ImageJ* se procedió a visualizar las fotografías y a realizar el conteo de las estomas, los resultados se expresaron en número de estomas por milímetro cuadrado (N° estomas/mm²) y utilizando el área foliar se estimó el N° estomas/hoja.

3.2.9. Análisis de componente principales

A partir de la cuantificación de los diferentes caracteres funcionales evaluados se realizó un análisis de componentes principales para ello se utilizó el paquete *FactoMineR* en el software *R Commander*, a partir de este paquete también se halló un análisis clúster el cual nos permitió conocer si existe alguna similitud mediante el cual las especies se agrupan. Por último, se halló un círculo de correlaciones para saber que caracteres funcionales están directa o inversamente relacionados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INVENTARIO DE ÁRBOLES

Se registraron 1268 individuos de porte arbóreo (árboles y palmeras), estos fueron ordenados en 108 especies, 89 géneros distribuidos en 36 familias. El 27.7 % del total de especies registradas, corresponde a la flora nativa peruana. Solari y SERPAR (2012) señalan que en la ciudad de Lima encontraron 57 especies arbóreas, el estudio fue desarrollado en 174 parques y 361 vías con jardines, en ese sentido, resaltamos el número de especies encontradas solo en el campus de la PUCP. En octubre del año 2019 la municipalidad de Magdalena del Mar-Lima, inició el censo de los árboles presentes en todo su distrito, el fin fue conocer el estado fitosanitario y la composición de especies. Esta municipalidad, resalta la importancia del conocimiento de sus árboles para desarrollar proyectos de conservación y recuperación de sus áreas verdes y mejorar la calidad de vida de sus vecinos (Andina 2009).

4.2. MAPEO DEL ARBOLADO

El mapa elaborado muestra vista de planta, la ubicación de cada uno de los individuos arbóreos registrados en el inventario. Este producto obtenido originalmente elaborado en un tamaño A1, será una herramienta didáctica en la enseñanza y aplicación de la gestión del arbolado urbano presente en el campus de la PUCP (Anexo 3).

4.3. ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN

La Figura 4.1 muestra la distribución del número de individuos por familia, donde destacan Arecaceae (297), Malvaceae (223) y Fabaceae (212) como las familias con el mayor número de individuos, la suma de sus individuos representa el 58 % del total de árboles encontrados, por otro lado, se hallaron familias como, Caricaceae, Lythraceae, Malpigiaceae, Oxalidaceae y Phytolacaceae representadas únicamente por un solo individuo.

En el estudio realizado por Solari y SERPAR, (2012) registraron 31 familias y 57 especies, siendo Fabaceae (8), Arecaceae (6), Moraceae (4) y Anacardiaceae (4) las familias con el mayor número de especies.

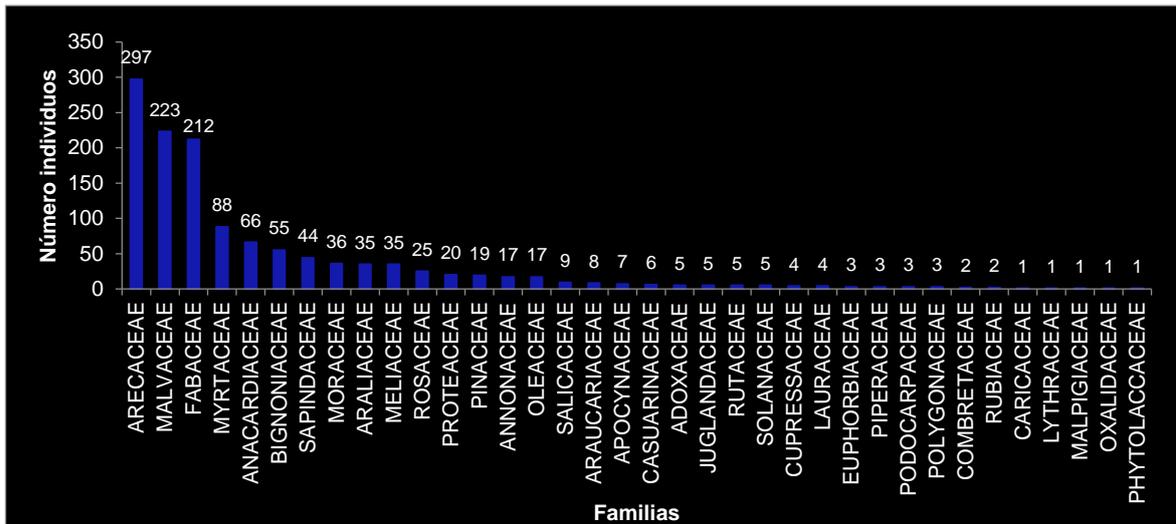


Figura 4.1: Número de individuos por familia.

La familia Fabaceae (Figura 4.2) presenta 14 géneros seguida por la familia Arecaceae presenta 9 géneros, 19 familias están representadas por un solo género, entre ellas destacan Moraceae, Araliaceae, Pinaceae, Araucariaceae, entre otros.

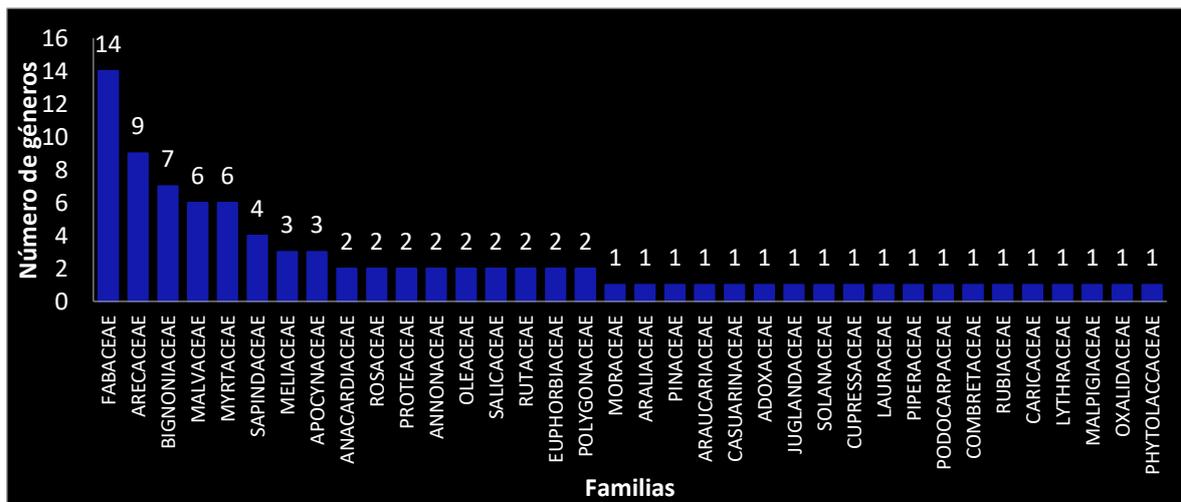


Figura 4.2: Número de géneros por familia.

El género *Archontophoenix* (178) es el que presenta el mayor número de individuos (Figura 4.3), seguido por *Ceiba* (79), *Delonix* (68), *Eucalyptus* (65), por otro lado, 57 géneros presentan menos de 9 individuos, los géneros que están representados por un solo individuo son: *Averrhoa*, *Bunchosia*, *Callianda*, *Coccoloba*, *Lafoensia*, *Markhamia* entre otros.

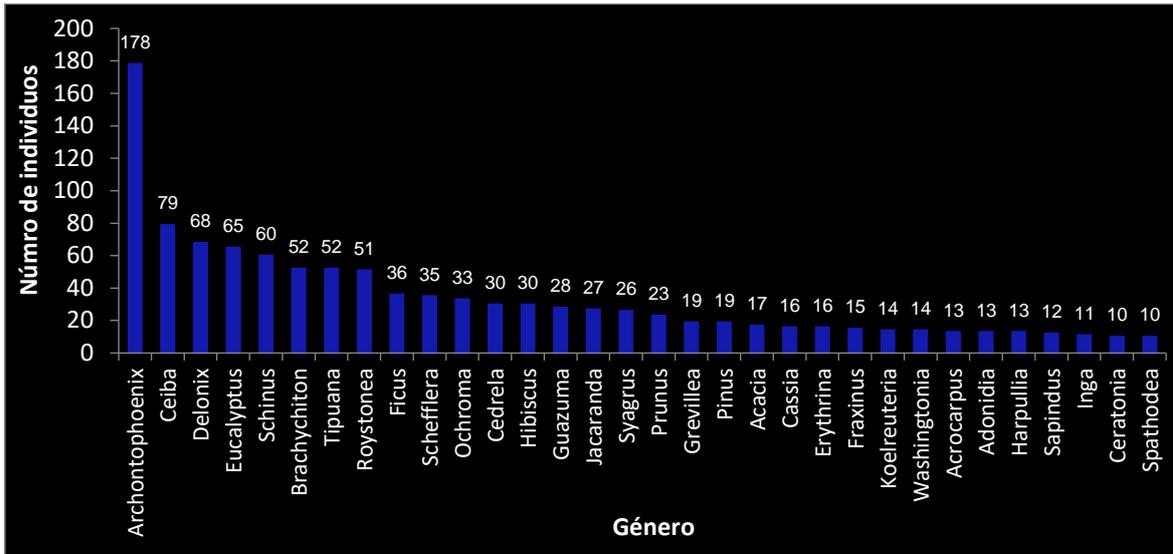


Figura 4.3: Número de individuos por género.

La Figura 4.4 muestra que, el género *Ficus* es el que presenta el mayor número de especies (8), seguido por *Erythrina*, *Eucalyptus*, *Prunus* con 3 especies cada una, luego siguen *Acacia*, *Cassia*, *Ceiba*, *Guazuma*, *Inga* y *Schinus* representados por dos especies cada una.

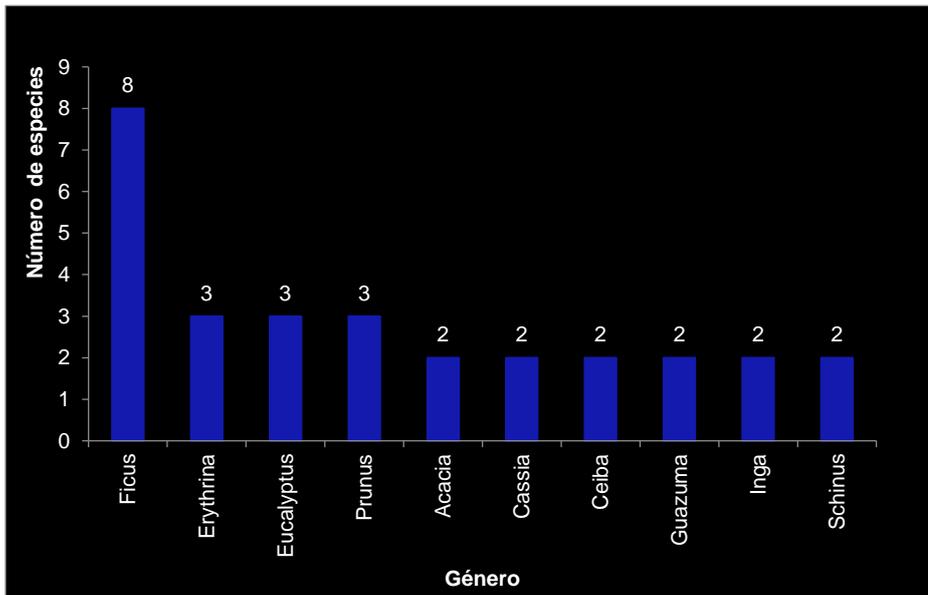


Figura 4.4: Número de especies por género.

La Figura 4.5 muestra que, *Archontophoenix alexandrae* (178), es la especie que presenta el mayor número de individuos, seguido por *Ceiba speciosa* (72), *Delonix rejia* (68), *Brachychiton acerifolius* (52) y *Tipuana tipu* (52). Entre las familias que están representadas por un solo individuos se encuentran *Averrhoa carambolo*, *Bunchosia armeniaca*, *Coccoloba uvifera*, *Ficus religiosa*, *Gleditsia triacanthos*, *Guazuma ulmifolia*, *Lafoensia puniceifolia*, *Lagunaria patersonia*, *Markhamia lutea*, etc.

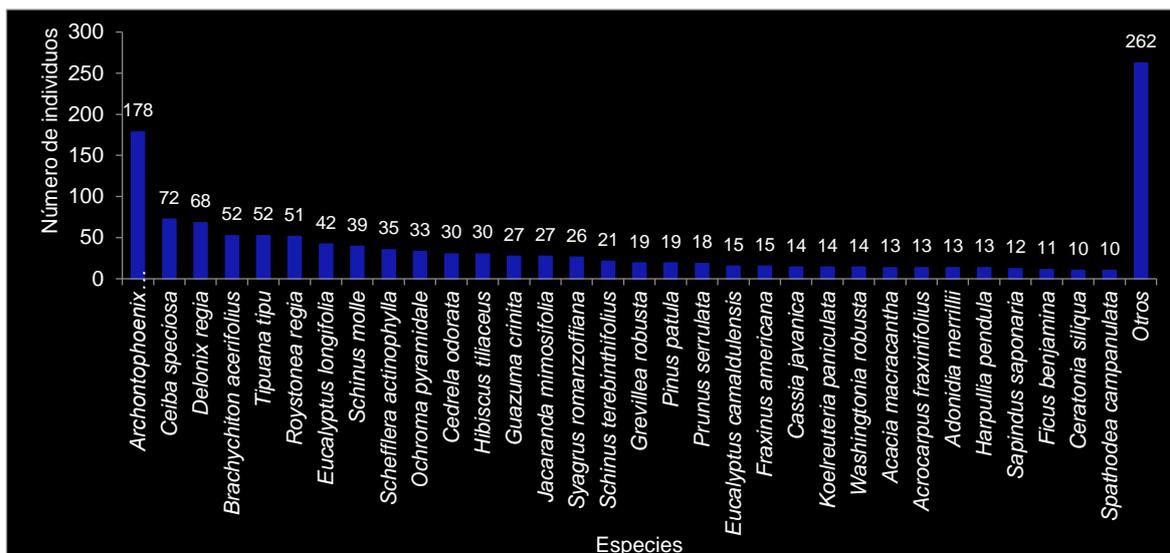


Figura 4.5: Número de individuos por especie.

La composición de especies, muestra a la familia *Arecaceae* como la más abundante (297 individuos) y la segunda con el mayor número de especies (9), este resultado refleja la estructura de muchas áreas verdes de la ciudad de Lima. Figueroa y Rojo (2009) señalaron que el uso de las palmeras, fue favorecido por el simbolismo religioso que representa y a su valor estético en el urbanismo moderno.

Cobo (1890) mencionó que los españoles que llegaron a vivir en Lima, trajeron plantas y semillas desde España como vides, olivos y palmas, entre estas últimas fueron los dátiles las primeras palmeras sembradas y que se desarrollaron mejor que sus semejantes europeos. En ese sentido la bibliografía también hace mención a los años 1624 y 1630 donde, consideraron su presencia para nombrar lugares como Las Palmas (Jr. Rufino Torrico) o Esquina de la Palma (cuadra 10 del Jr. Ancash) (Bromley 2019). A inicios de 1900 se emprende la reforma de la plaza mayor de Lima, plantando en los jardines muchas palmeras regias, estas crecieron y modificaron el paisaje urbano hasta aparentar ser un paisaje exótico (Negro 2009).

4.4. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA

4.4.1. Estructura horizontal

La Figura 4.6, muestra la distribución del área basal por familia, siendo 75.199 m², el total de área basal calculada, y la familia *Arecaceae* (20.885 m²) presenta la mayor área basal, seguida de *Fabaceae* (13.130 m²) y *Malvaceae* (8.689 m²).

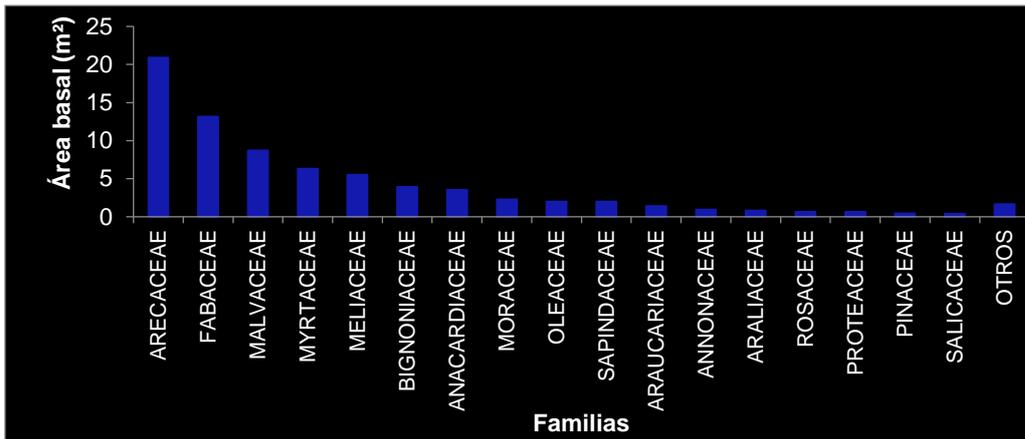


Figura 4.6: Área basal por familias.

La especie que presenta la mayor área basal fue *Roystonea regia* con 8.88 m² (Figura. 4.7), seguido por *Tipuana tipu* (7.18 m²), *Archontophoenix alexandrae* (5.61 m²), 88 especies presentaron cada una, un área basal menor a 1 m², pero cuya sumatoria alcanza los 17.11 m².

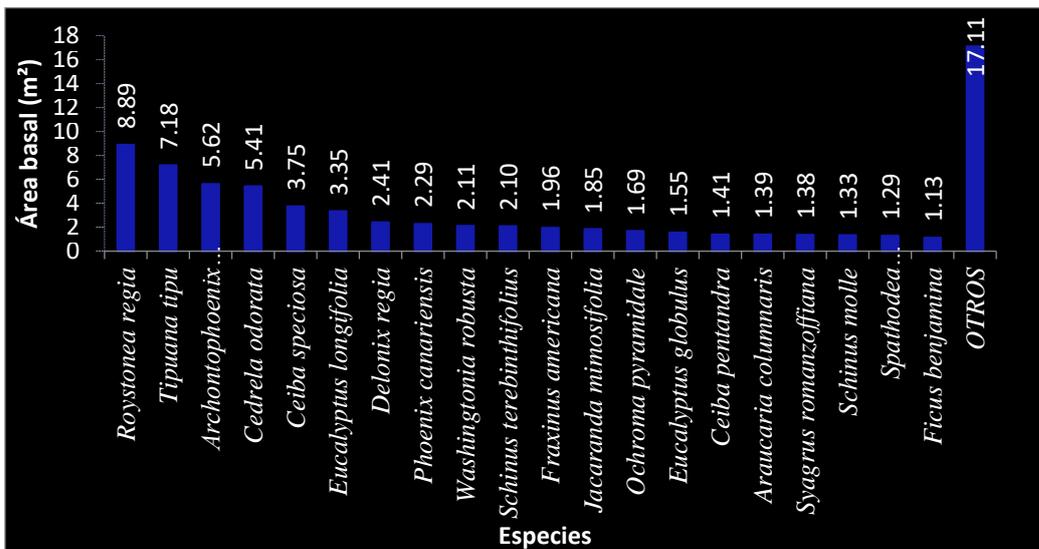


Figura 4.7: Distribución del área basal por especies.

La distribución de los diámetros en frecuencias agrupadas en intervalos (Figura. 4.8) muestra que 616 individuos se encuentran en la categoría diamétrica $9.8 \geq DAP < 19.8$, seguida por el intervalo $19.8 \geq DAP < 29.8$ que contiene a 367 individuos. El individuo con el mayor diámetro hallado corresponde a *Ceiba trichistandra* con 118 cm de diámetro.

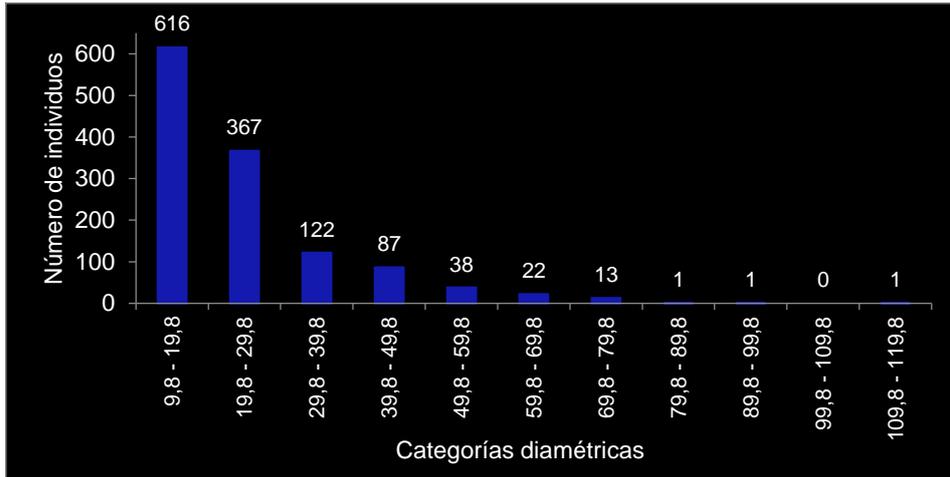


Figura 4.8: Distribución de individuos por categorías diamétricas.

4.4.2. Estructura vertical

Los 3 individuos que alcanzaron mayor altura (Figura 4.9), corresponden a *Washingtonia robusta* (25.4 m), *Araucaria columnaris* (21.9 m), *Eucalyptus globulus* (21.8 m).

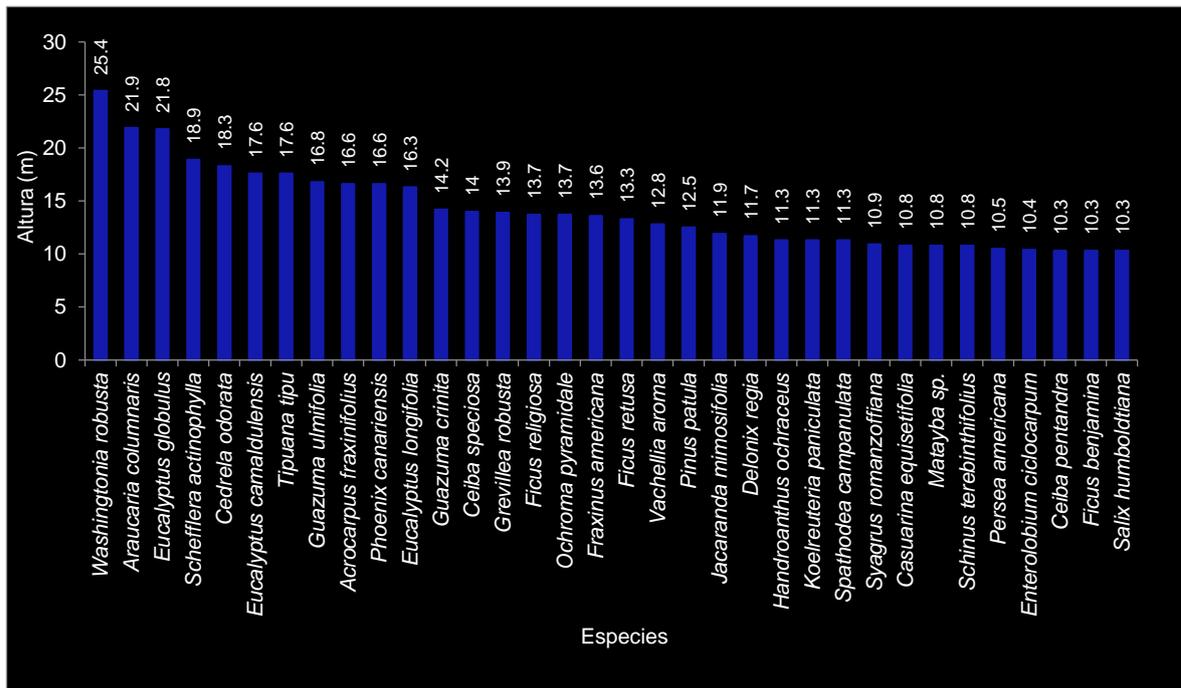


Figura 4.9: Individuos arbóreos más altos.

La altura promedio a nivel de especies (Figura. 4.10), muestra que *Guazuma ulmifolia*, *Araucaria columnaris*, *Ficus religiosa*, *Eucalyptus globulus* son las especies que alcanzan mayores alturas por otro lado, las especies que presentan alturas más pequeñas corresponden a *Prunus serrulata*, *Olea europea*, *Adonidia merrillii* y *Calliandra angustifolia*.

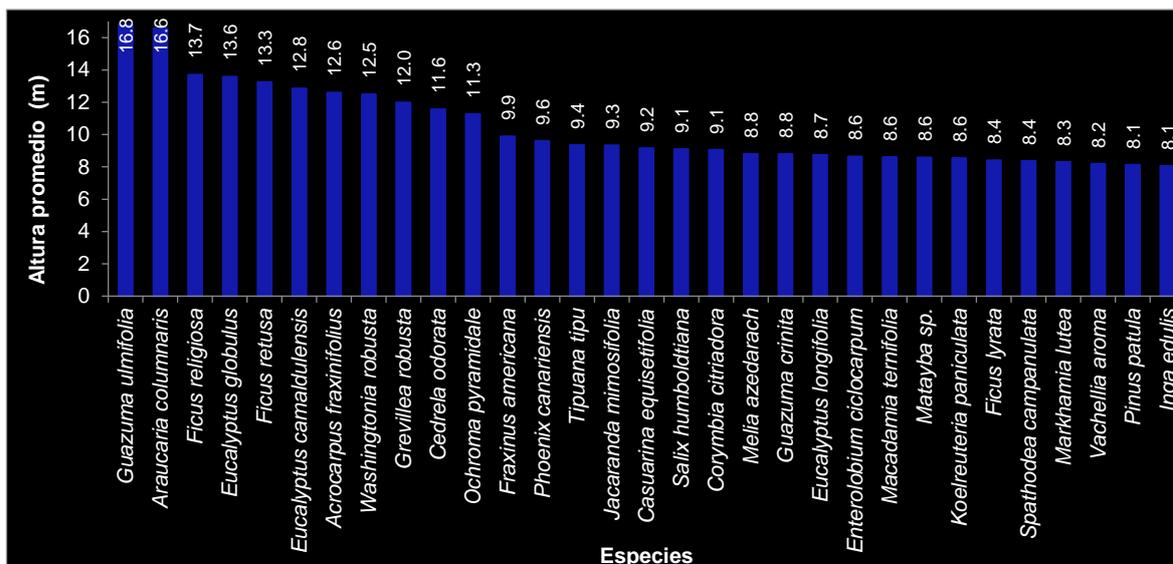


Figura 4.10: Altura promedio por especies.

La distribución de las alturas en frecuencias agrupadas por intervalos (Figura 4.11), muestra que en el intervalo $5.9 \leq \text{altura} < 7.9$, se encuentra el mayor número de individuos (496), son muy pocos los individuos que presentan alturas superiores a los 20 metros.

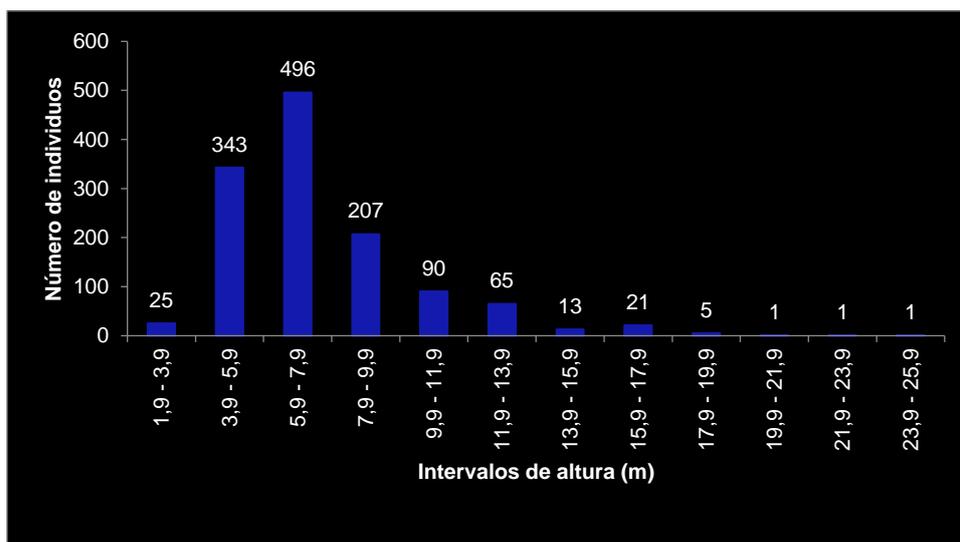


Figura 4.11: Distribución de individuos en intervalos de altura.

4.5. ANÁLISIS DE LA BIOMASA AÉREA ALMACENADA

La biomasa aérea almacenada en los 1268 individuos, estimada a partir de las ecuaciones de McPherson *et al.* (2016) y Chave *et al.* (2005) fue de 291.69 y 207.332 t respectivamente. El promedio de variación entre ambas ecuaciones es de 30 %.

Generalmente, los árboles urbanos están dispuestos de manera uniforme, y su distanciamiento obedece principalmente al diseño. A diferencia de un ecosistema forestal, los árboles urbanos no tienen la necesidad de competir por la luz por ello pueden desarrollar una copa extendida con abundante follaje, potenciado por el riego, el mantenimiento y niveles altos de CO₂ (McPherson *et al.* 2016). Por otro lado, se verán afectados por los espacios reducidos, las plagas, la poda, etc. Las ecuaciones formuladas para ecosistemas forestales consideran otros parámetros como el tipo de bosque, la precipitación, etc., por lo que es necesario aplicar ecuaciones específicas para ecosistemas urbanos. En ese sentido, la ecuación formulada por McPherson *et al.* (2016) es la que tiene una mejor estimación de la biomasa pues considera parámetros como la condición y ubicación, edad, volumen y diámetro de la copa del árbol.

La Figura 4.12, muestra que la familia Fabaceae (71.489 t) almacena mayor biomasa aérea, seguida por Myrtaceae (49.623 t), Meliaceae (30.009 t). La biomasa almacenada en los árboles pertenecientes a estas tres familias, equivale a más del 50 % de la biomasa presente en el campus.

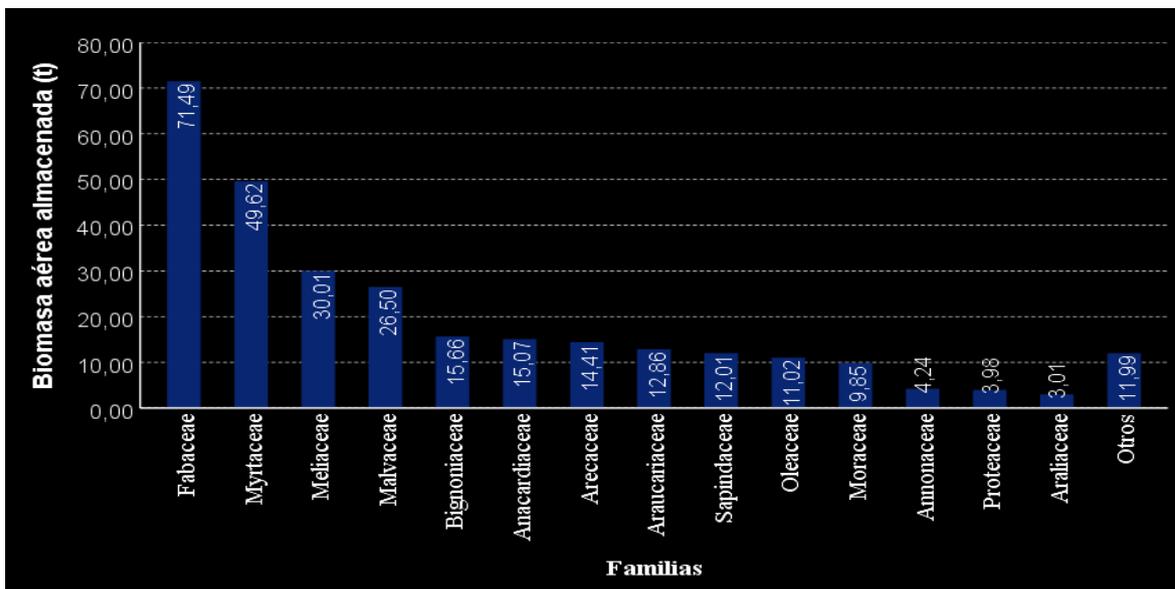


Figura 4.12: Distribución de la biomasa en familias.

A nivel de géneros (Figura 4.13), Eucalyptus (45.756 t), Tipuana (44.141 t) y Cedrela (29.675 t), son los géneros que almacenan mayor biomasa. Existen 70 géneros que cada uno almacenada menos del 1 % de la biomasa total, siendo el total acumulado de 50.134 t.

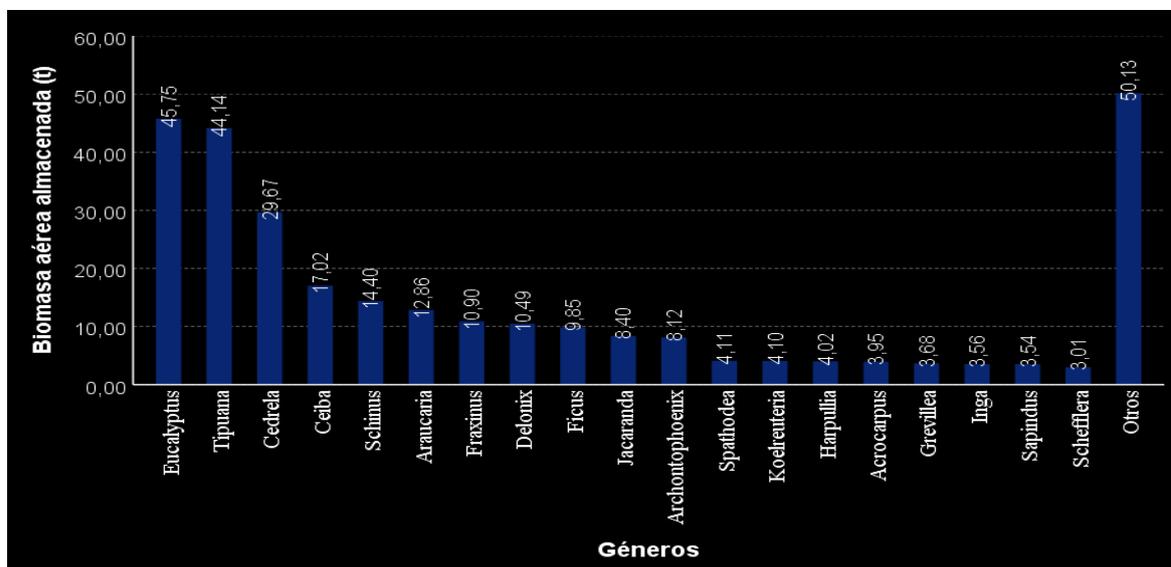


Figura 4.13: Contenido de biomasa por géneros.

La especie que presenta la mayor biomasa (Figura 4.14), fue *Tipuana tipu* (44.141 t), seguida por *Cedrela odorata* (29.675 t) y *Eucalyptus longifolia* (26.173 t). Existen 86 especies que almacenada cada una menos del 1 % de la biomasa total, siendo el total acumulado de 59.233 t.

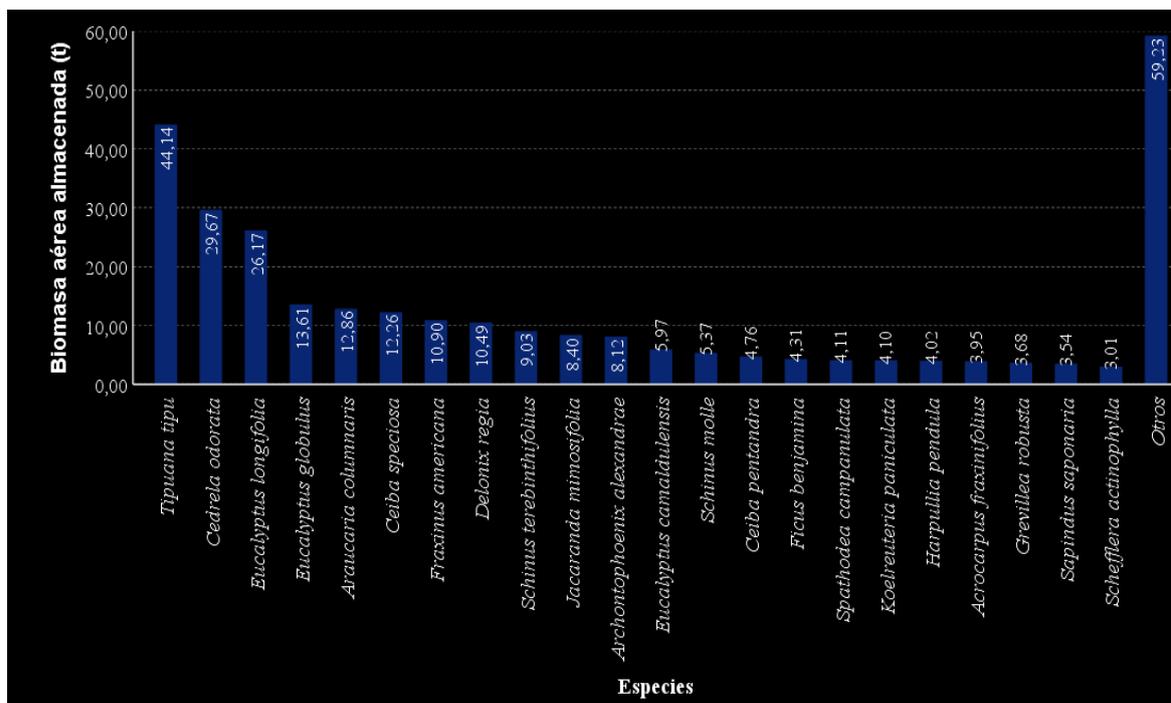


Figura 4.14: Distribución de la biomasa por especies.

La Figura 4.15 muestra la biomasa presente por categorías diamétricas, se observa que, un solo árbol puede contener una considerable cantidad de biomasa, *Ceiba trichistandra* con 118 cm de DAP y una altura de 15.3 m puede almacenar una biomasa de 4.068 t, el cual es equivalente a la biomasa de 119 árboles con un DAP comprendido entre 10 y 11.5 cm.

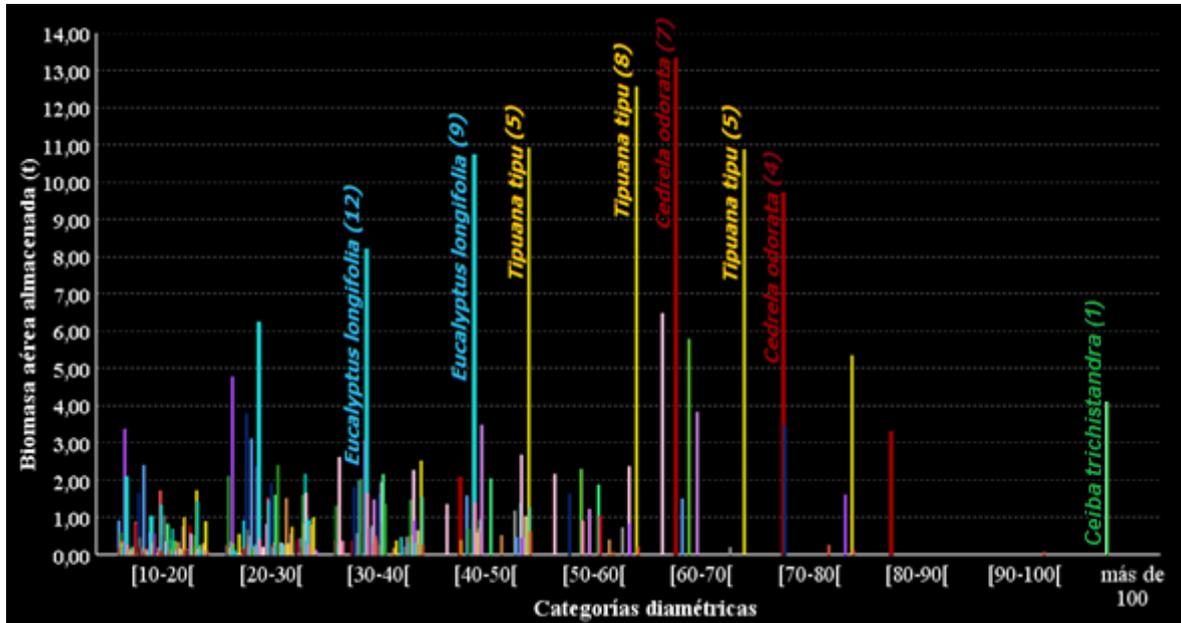


Figura 4.15: Distribución de la biomasa en categorías diamétricas.

A pesar de que la familia Arecaceae tuvo los valores más altos en composición y estructura, la biomasa que almacenan representa únicamente el 4.041 % del total calculado, siendo superado por familias que tienen menor abundancia y dominancia como Myrtaceae y Meliaceae, en ese sentido, Figueroa y Rojo (2009) mencionan que las palmas no son buenos sumideros de carbono, siendo reducida su función ecosistémica a diferencia de su alto valor paisajístico. Goodman *et al.* (2013), lograron desarrollar ecuaciones alométricas a partir de datos obtenidos en la amazonía peruana, calculando con mayor precisión la biomasa almacenada en las palmeras, recomendaron considerar la altura del tallo en los cálculos de biomasa. En el presente estudio se utilizó la ecuación propuesta por Frangi y Lugo (1985) quienes ya consideraban la altura total de la palmera en su ecuación.

Transformando los datos de biomasa a toneladas de carbono (reserva, se estimó que son 145.847 toneladas de carbono presente en los 1268 árboles.

4.6. ANÁLISIS DE MATERIAL PARTICULADO

4.6.1. Material particulado en la atmosfera del campus

En base a los datos sobre la concentración de material particulado monitoreados en la

estación meteorológica del Campo de Marte (Figura 4.16), se elaboró un gráfico en el que se muestra el comportamiento de las concentraciones del PM_{10} y $PM_{2.5}$ desde el año 2011 y 2014 respectivamente, hasta el año 2019. La concentración del PM_{10} muestra un descenso, pues las concentraciones de los años recientes son inferiores a los de años anteriores, Pacsi (2016) y Espinoza (2018) también muestran dicha tendencia.

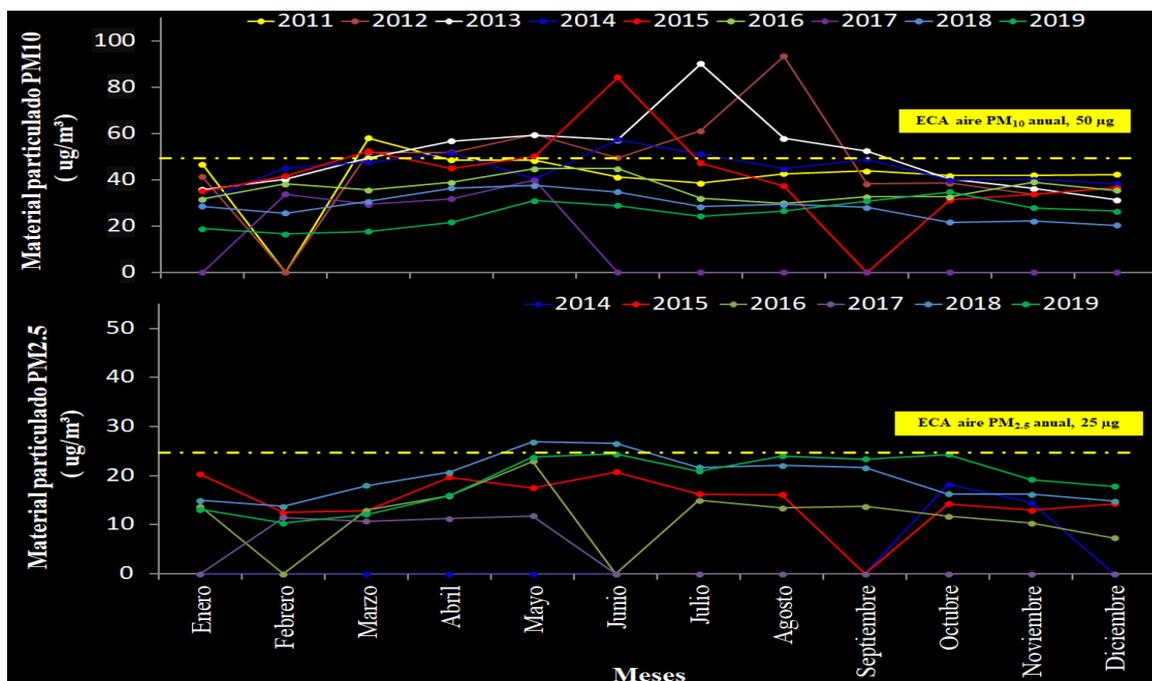


Figura 4.16: Histórico de las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$, Campo de Marte – Jesús María.

Del mismo modo MINAM (2019) señala que, en los últimos 12 años, la calidad de aire de la ciudad de Lima mejoró pues la concentración de material particulado se redujo de $77.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2006) a $28.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2018), esto debido principalmente al mayor uso de combustibles limpios (GNV y GLP), nuevos sistemas de transporte público (tren eléctrico, metropolitano) etc.

En cuanto al $PM_{2.5}$, se observa que la concentración de los años recientes, es mayor a los años anteriores, Pacsi (2016) señaló un leve descenso hasta el año 2014 pero Espinoza (2018) mostró descenso más alto en las concentraciones de $PM_{2.5}$ hasta el año 2018. En el presente estudio, observamos que en la estación meteorológica del Campo de Marte las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron incrementándose en los últimos años. Los estudios hechos por Pacsi (2016) y Espinoza (2018) fueron a partir de la data almacenada en todas las estaciones meteorológicas conducidas por el SENAMHI y la DIGESA utilizando en sus análisis promedios mensuales y anuales. La concentración de PM_{10} , registradas en los

últimos años en la estación Campo de Marte, se encuentra por debajo del ECA anual pero la concentración de PM_{2.5} se encuentra muy cercana al ECA anual entre mayo y octubre.

En cuanto al muestreo pasivo (placas receptoras) realizado en el campus de la PUCP, se halló un promedio de 0.634 mg/cm².mes de Partículas Sólidas Sedimentables (PTSe) esto indica que, la cantidad PTSe se encuentra por encima del límite máximo permisible que propone el Organismo Mundial de la Salud (0.5 mg/cm².mes). En un estudio similar realizado en el campus de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, hallaron entre 0.2 y 1.15 mg/cm².mes de PTSe (Marcos *et al.* 2008).

4.6.2 Material particulado (MP) retenido en las hojas

La respuesta de las plantas a las condiciones ambientales, así como su morfología son variadas, en ese sentido las características morfológicas foliares de las especies elegidas, se muestran en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1: Características morfológicas foliares de las especies elegidas.

Familia	Especie	Follaje	Forma de hoja	Nº. Ind. PUCP
Malvaceae	<i>Brachychiton acerifolius</i>	Semi-caducifolio	Lobulada	52
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i>	Caducifolia	Palmaticompuesta	72
Malvaceae	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	Perennifolia	Cordadas-ovadas	30
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i>	Perennifolia	Obadas	11
Sapindaceae	<i>Koelreuteria paniculata</i>	Caducifolia	Bipinnada	14
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i>	Perennifolia	Imparipinnada	39
Anacardiaceae	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Perennifolia	Imparipinnada	21
Fabaceae	<i>Delonix regia</i>	Caducifolia	Bipinnada	68
Fabaceae	<i>Tecoma stans</i>	Perennifolia	Imparipinnada	9
Fabaceae	<i>Tipuana tipu</i>	Caducifolia	Imparipinnada	52

FUENTE: elaboración propia

Las especies *Ceiba speciosa*, *Delonix regia*, *Tipuana tipu*, *Brachychiton acerifolius*, *Schinus molle*, *Hibiscus tiliaceus*, fueron elegidas debido a la cantidad de individuos encontrados en el campus. Existen otras especies con mayor número como *Archontophoenix alexandrae* (178 individuos) *Eucalyptus longifolia* (42 individuos), pero debido a su elevada altura no fueron considerados en el muestreo. Por otro lado, *Koelreuteria paniculata*, *Ficus benjamina* y *Tecoma stans* fueron consideradas debido a su frecuencia en las áreas verdes de la ciudad

de Lima (Solari y SERPAR, 2012). Las características generales de los individuos seleccionados se muestran en el Cuadro 4.2.

Cuadro 4.2: Características dasométricas de los individuos elegidos.

Familia	Especie	Código	DAP (cm)	Altura (m)	Muestra (N° hojas)
Malvaceae	<i>Brachychiton acerifolius</i>	119	19	6.3	11
		3	14.2	5.1	7
		373	12.6	3.5	7
	<i>Ceiba speciosa</i>	316	16.7	3.4	8
		196	30.8	5.2	8
		353	21.9	4.1	8
	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	97	13.5	3.2	9
		302	30.5	5.1	9
		539	12.7	4.9	9
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i>	1096	32.7	5.1	25
		640	26.3	6.2	25
		1165	33.2	6.1	25
Sapindaceae	<i>Koelreuteria paniculata</i>	18	29.5	6.5	6
		724	16.2	6.4	6
		1170	25.2	5.9	6
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i>	996	12.6	4.5	12
		1176	19	5.1	12
		805	46	6.2	12
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	770	35.5	5.4	20
		870	31.6	7.6	20
		51	29.2	7.1	20
Fabaceae	<i>Delonix regia</i>	382	26.4	5.5	7
		1133	19.5	5.6	5
		823	21.4	3.5	5
	<i>Tecoma stans</i>	355	17.7	6.1	7
		754	30.3	5.4	8
		516	23.4	6.2	8
	<i>Tipuana tipu</i>	643	51.6	2.5	7
		404	22.6	6.3	8
111		13.9	5.5	8	

FUENTE: Elaboración propia

Los resultados señalan que *Ficus benjamina*, *Brachychiton acerifolius* y *Tipuana tipu*, son las especies que acumulan mayor cantidad de MP, sobrepasando los 2.5 g/m² de área foliar, por otro lado, *Delonix regia* e *Hibiscus tiliaceus* acumulan menos de 0.5 g/m² (Figura 4.17).

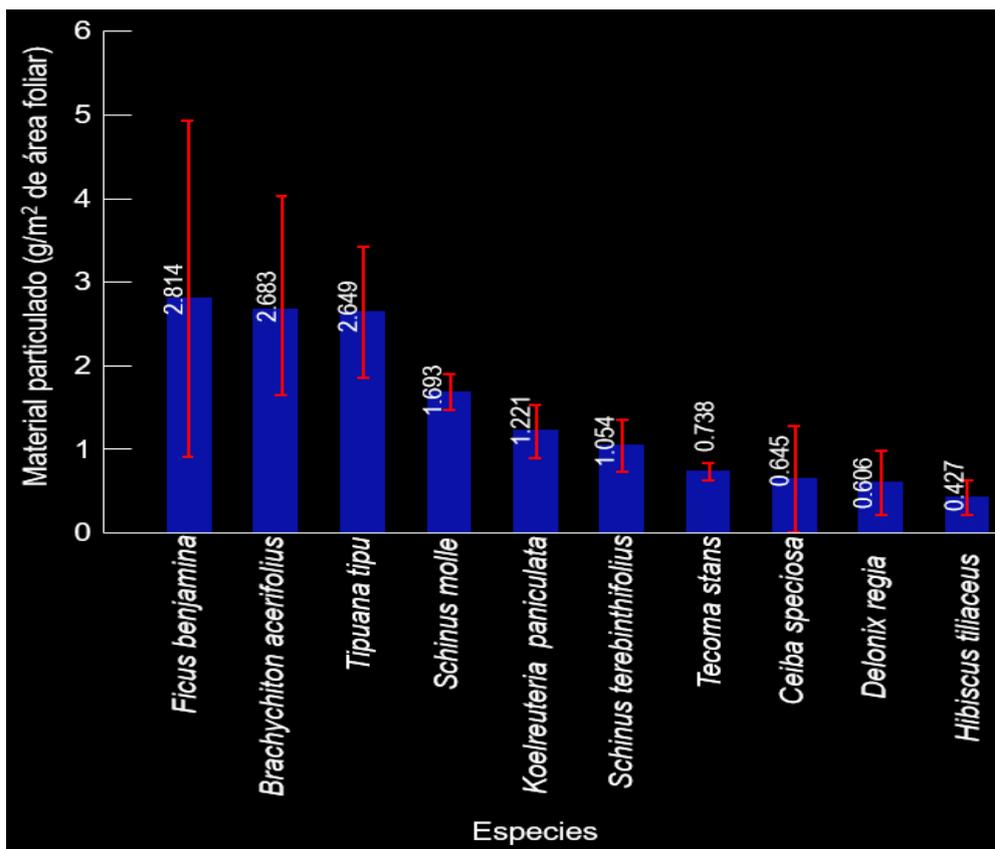


Figura 4.17: Retención de material particulado (g) /área foliar (m²).

Alegre *et al.* (2007) en un estudio realizado en dos avenidas principales de la ciudad de Lima, estimaron que *Tipuana tipu* y *Tecoma stans*, adsorben 1.675 y 1.233 g de sólidos suspendidos por m² de área foliar respectivamente, en el presente estudio se encontró 2.649 g/ m² en *Tipuana tipu* y 0.737 g/ m² en *Tecoma stans*. También concluyen que *Tipuana tipu* es la especie que adsorbe mayor cantidad de sólidos suspendidos (MP). En un estudio desarrollado en el condominio la Quebrada – Cieneguilla, Chipoco y Valencia (2015) estimaron que *Schinus terebinthifolius* retienen 2.7036 g de sólidos suspendidos por m² de área foliar, en el presente estudio se estimó que *S. terebinthifolius* retiene 1.054 g/ m² de área foliar. En cuanto a *Ficus benjamina*, Angulo (2018) realizó un estudio en el Parque Zonal Mayta Capac – San Martín de Porres donde estimó que dicha especie retiene 5.368 g de polvo atmosférico sedimentable por m² de área foliar, en el presente trabajo se estimó que *F. benjamina* retiene 2.814 g/ m² de área foliar.

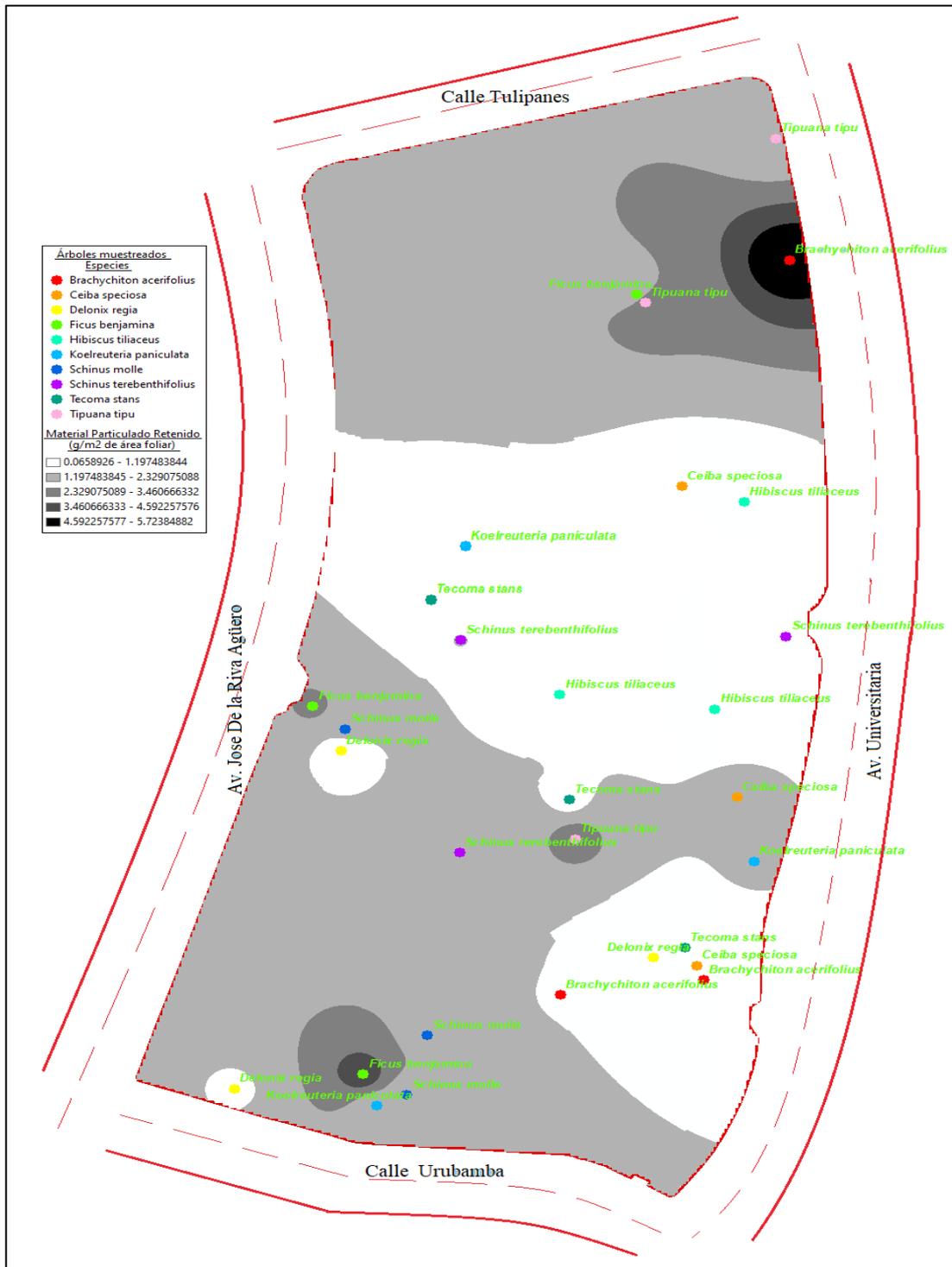


Figura 4.18: Isolíneas de MP retenido (g/m² área foliar) en los árboles muestreados.

La correlación entre la cantidad de MP retenido (m² de área foliar) (Anexo 18) y la distancia del árbol con las avenidas circundantes resultó en una correlación no significativa y también el gráfico de isolíneas (Figura 4.18), no muestra una relación de la cantidad de MP retenido con la distancia más próxima a alguna avenida circundante.

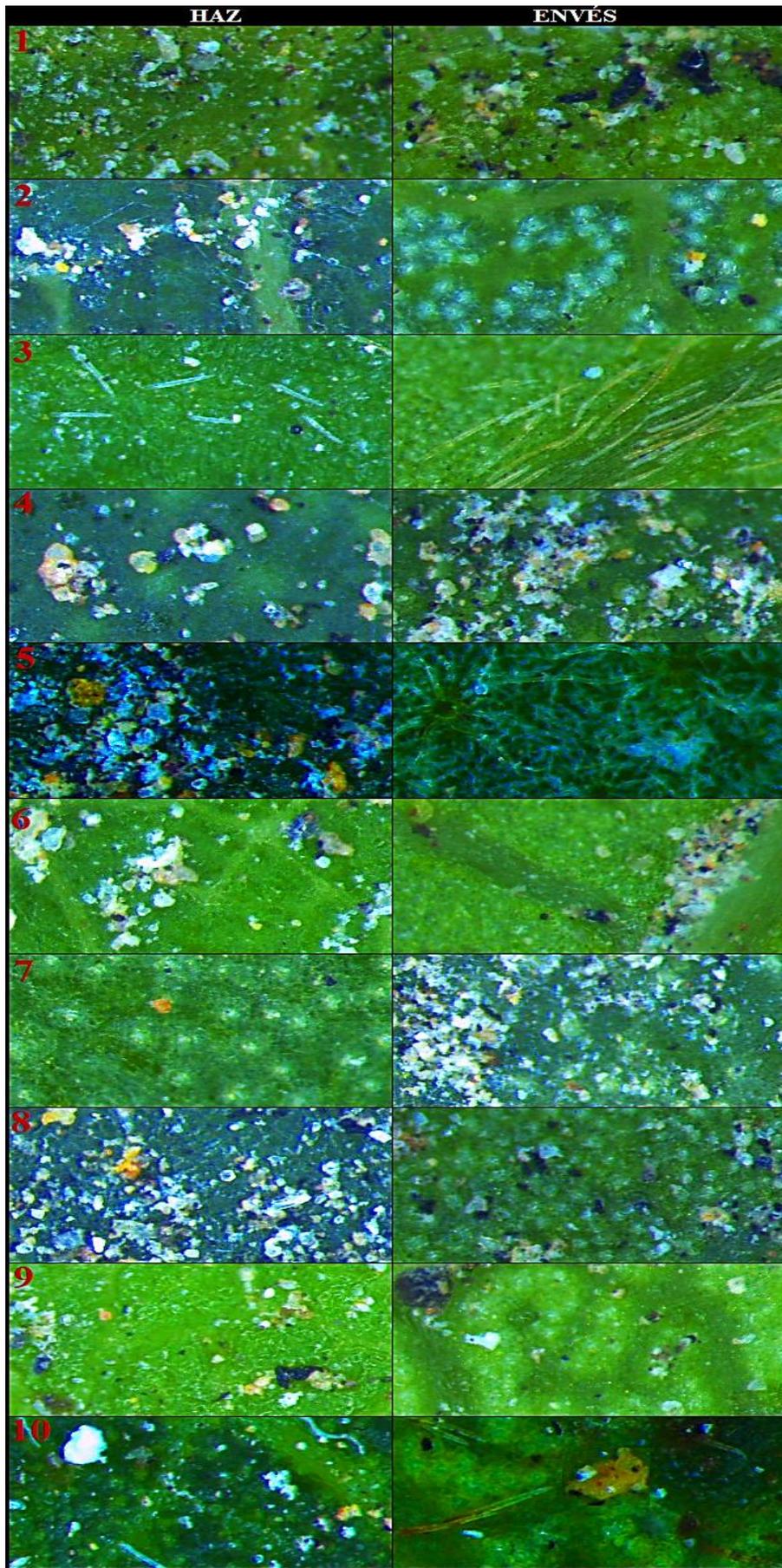


Figura 4.19:
Ubicación del material particulado a 50X (haz y envés).

Brachychiton acerifolius (1),
 Ceiba speciosa (2),
 Delonix regia (3),
 Ficus benjamina (4),
 Hibiscus tiliaceus (5),
 Koelreuteria paniculata (6),
 Schinus molle (7),
 Schinus terebinthifolius (8),
 Tecoma stans (9) y Tipuana tipu (10).

Utilizando un estereomicroscopio a 50X de aumento se observó que; *Brachychiton acerifolius*, *Ficus benjamina*, *Schinus terebinthifolius*, *Tecoma stans* y *Tipuana tipu* acumulaban MP tanto en el haz como en el envés, *Schinus molle* mostró mayor acumulación de MP en el envés, *Ceiba speciosa*, *Delonix regia*, *Hibiscus tiliaceus* y *Koelreuteria paniculata* acumularon mayor cantidad de MP en el haz (Figura 4.19).

Se observó que el material particulado generalmente se retiene y acumula a los bordes de las venas como en *Brachychiton acerifolius*, en la base y ápice de los foliolos de *Tipuana tipu*, *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius* y *Ceiba speciosa*, alrededor de las estomas como en *Schinus molle*. También se observa que *Tipuana tipu* y *Delonix regia* presentan escasos tricomas simples en el haz, pero en el envés presentan muchos más, por otro lado, *Hibiscus tiliaceus* presentó tricomas estrellados, escasos en el haz, pero muy abundantes en el envés, hasta cubrirlo por completo.

4.7. ANÁLISIS DE CARACTERES FUNCIONALES

4.7.1. Mediciones directas

El número de hojas que fueron empleadas para la medición de los diferentes caracteres funcionales se encuentra en el Cuadro 4.2. La especie que presentó el mayor grosor foliar fue *Schinus molle*, seguido por *Hibiscus tiliaceus* y *Schinus terebinthifolius*, por otro lado, las especies que tuvieron menor grosor fueron *Tecoma stans* y *Koelreuteria paniculata*. En cuanto a la longitud del peciolo *Brachychiton acerifolius* es la especie que presenta mayor longitud seguido por *Ceiba speciosa* y las especies que tuvieron el peciolo muy corto fueron *Ficus benjamina* y *Schinus terebinthifolius*.

Con respecto al área foliar, *Koelreuteria paniculata* fue la especie que presentó el mayor valor, con más de 800 cm² en promedio por hoja, seguido por *Delonix regia*, *Tecoma stans* y *Brachychiton acerifolius* que en promedio tienen 288, 181 y 170 cm² respectivamente de área foliar en promedio. Por otro lado, *Ficus benjamina* y *Schinus molle*, tuvieron el área foliar más pequeña 14 y 39 cm² respectivamente. Finalmente, las especies con mayor área foliar específica fueron *Tecoma stans* y *Ceiba speciosa* y las que tuvieron los valores bajos fueron *Schinus molle* y *Delonix regia* (Figura 4.20).

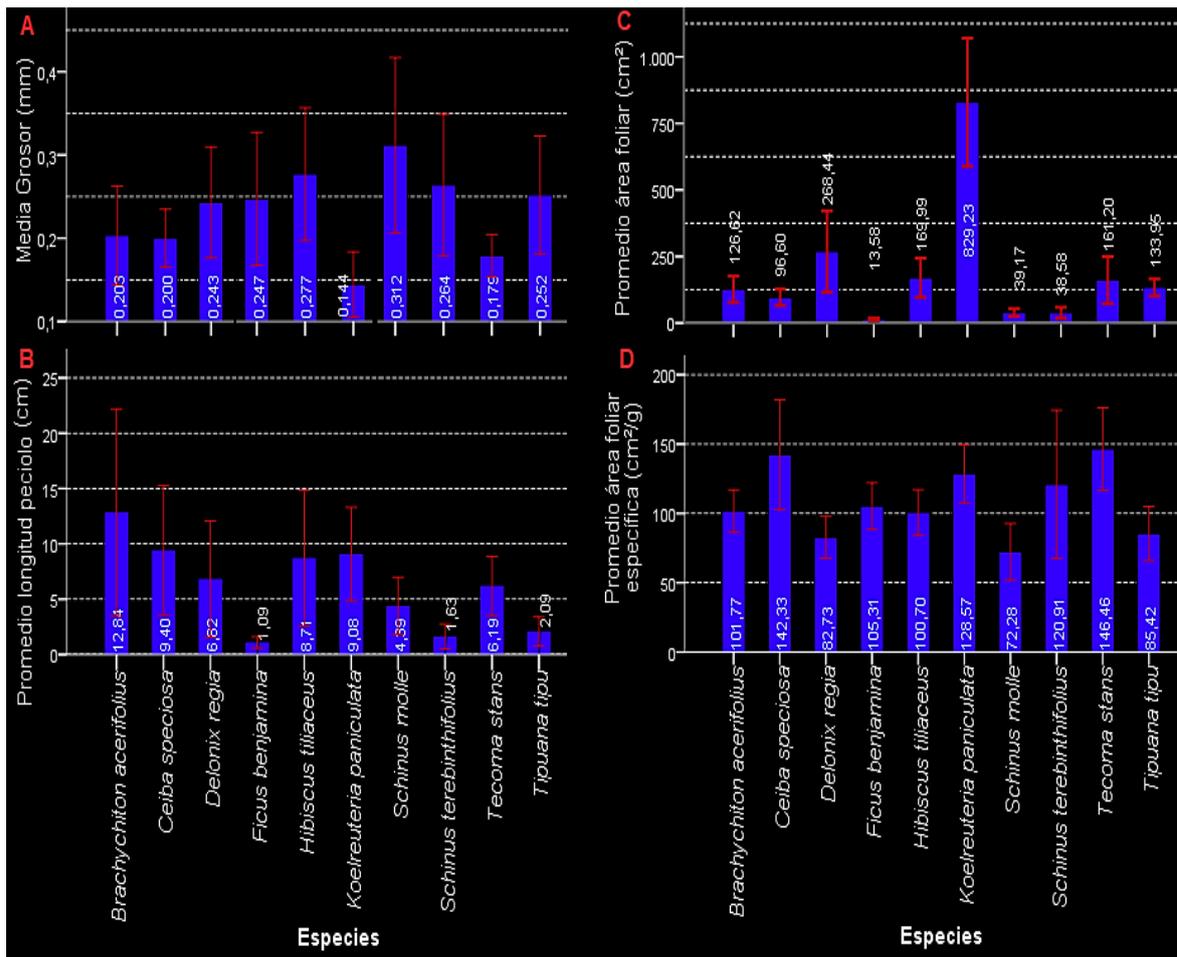


Figura 4.20: Cuantificación de los caracteres funcionales en las diferentes

4.7.2 Mediciones a través de análisis de imágenes

a. Venación y rugosidad

La especie que presentó el mayor porcentaje de área ocupada por venas fue *Ficus benjamina*, seguida por *Brachychiton acerifolius*, por otro lado, *Schinus terebinthifolius*, *Delonix regia* y *Schinus molle* presentaron menor porcentaje de cobertura de venas (Figura 4.21). Las Figuras 4.22 y 4.23 muestran una imagen en 3D del haz de las 10 especies muestreadas, también se observa el espectro de la intensidad de píxeles (valor gris) a partir del cual se obtuvo que, *Koelreuteria paniculata*, *Brachychiton acerifolius* e *Hibiscus tiliaceus* fueron las que presentaron mayor % de variabilidad en sus intensidades de píxel.

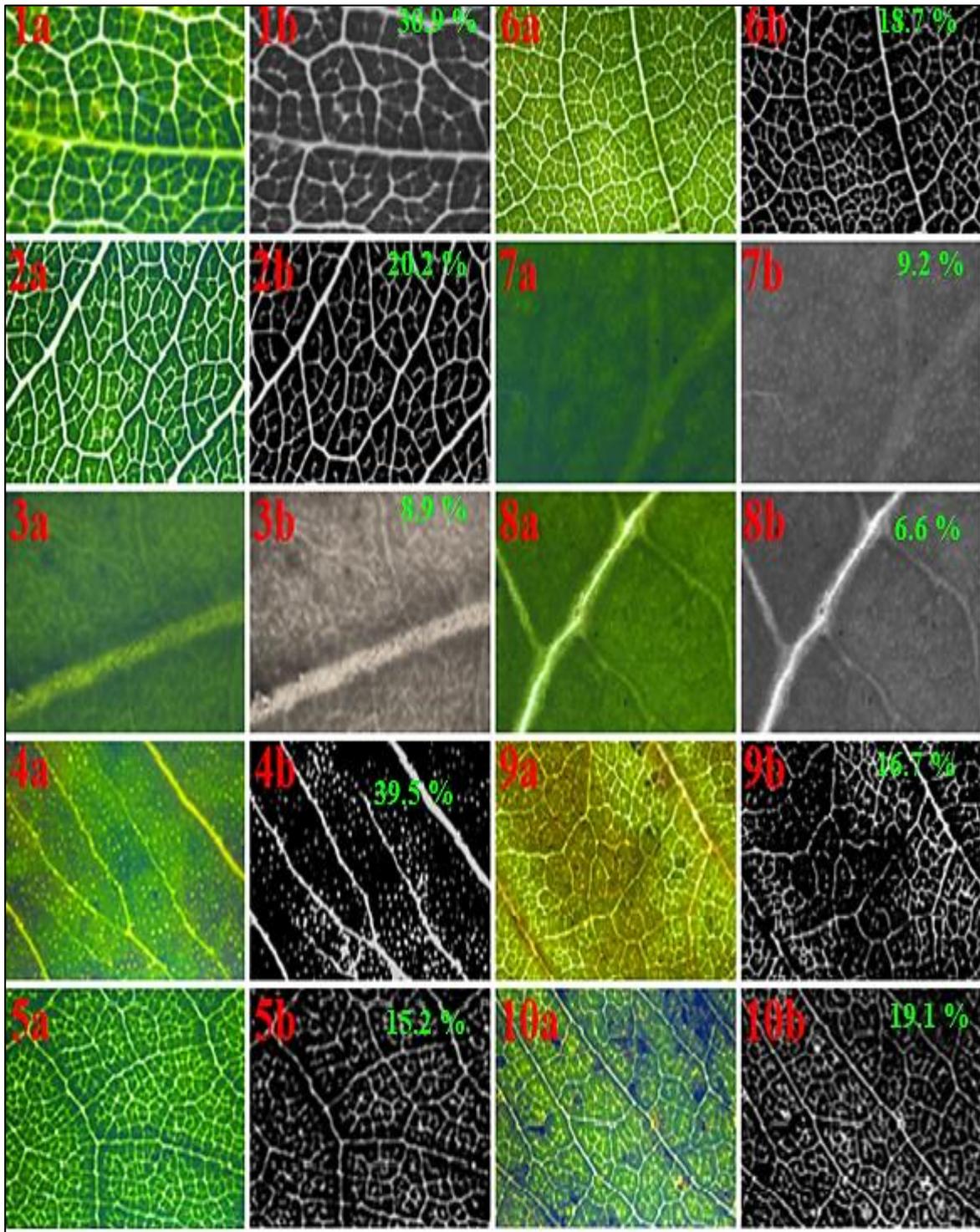


Figura 4.21: Porcentaje del área ocupada por las venas.

Brachychiton acerifolius (1), *Ceiba speciosa* (2), *Delonix regia* (3), *Ficus benamina* (4), *Hibiscus tiliaceus* (5), *Koelreuteria paniculata* (6), *Schinus molle* (7), *Schinus terebinthifolius* (8), *Tecoma stans* (9) y *Tipuana tipu* (10). Imagen a color real (a) imagen con escala de grises (b)

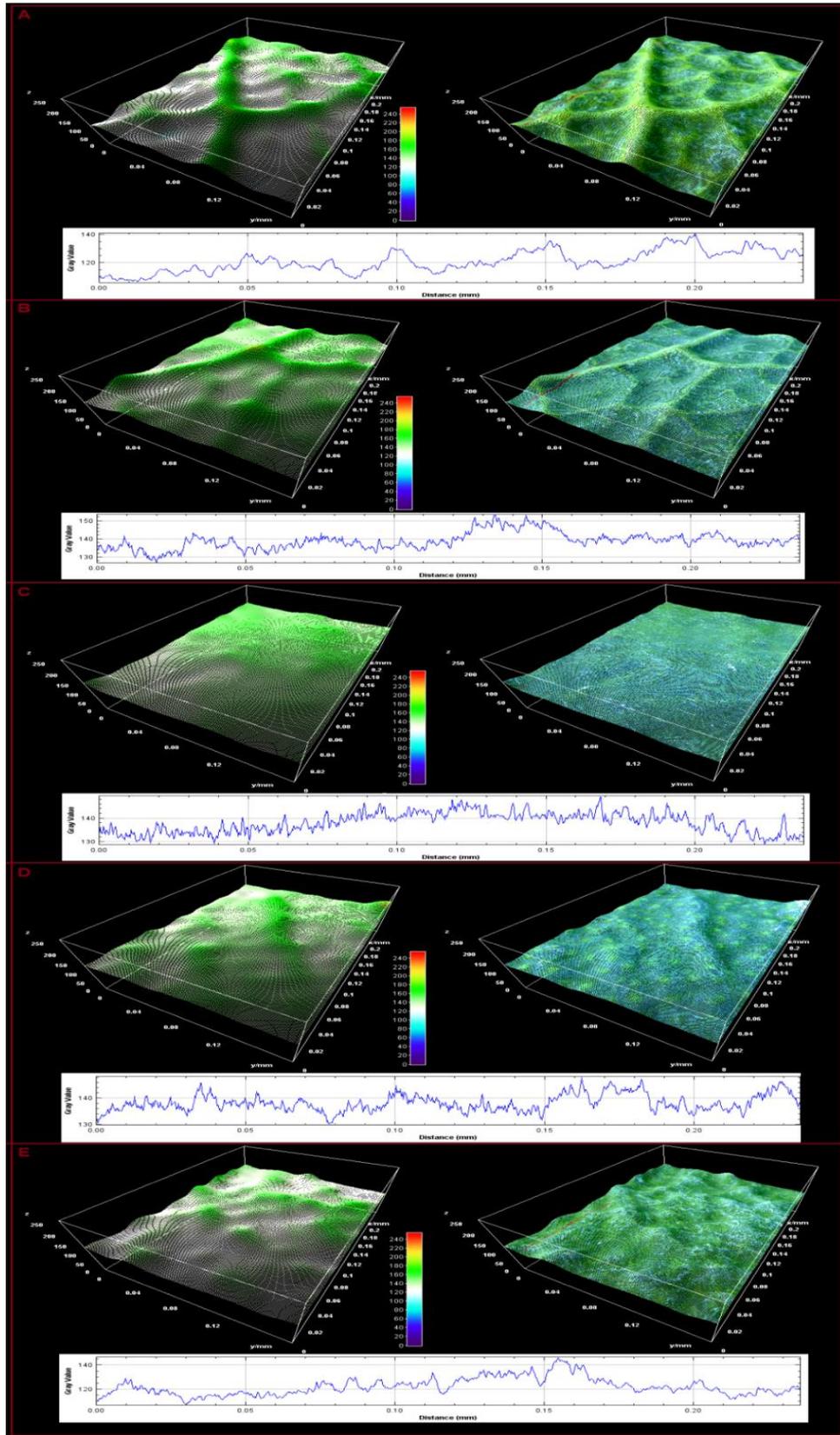


Figura 4.22: Imágenes 3D de la superficie del haz de la hoja y su respectivo espectro.

Brachychiton acerifolius (A), *Ceiba speciosa* (B), *Delonix regia* (C), *Ficus benjamina* (D) e *Hibiscus tiliaceus* (E).

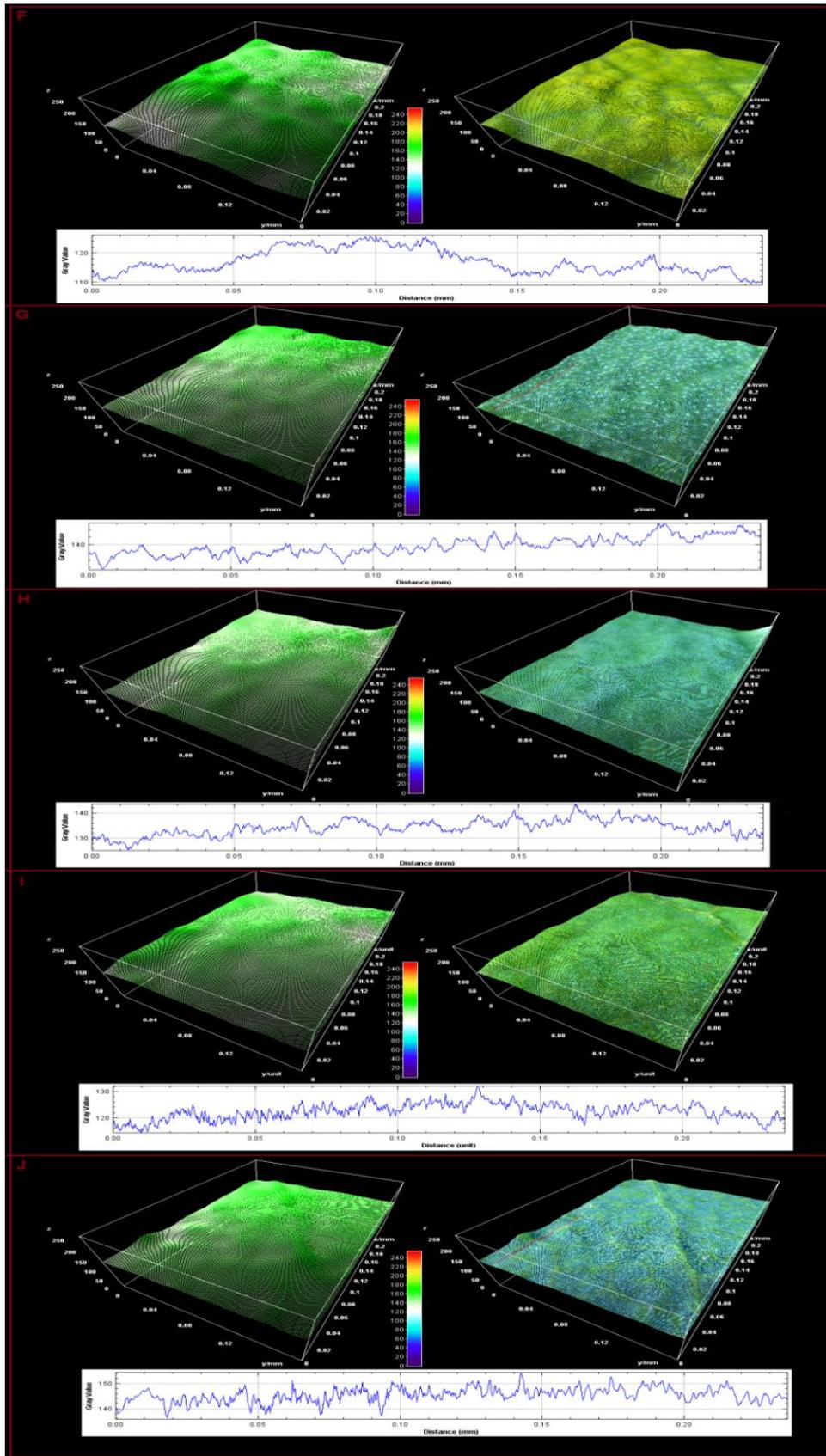


Figura 4.23: Imágenes 3D de la superficie del haz de la hoja y su respectivo espectro.

Koelreuteria paniculata (F), *Schinus molle* (G), *Schinus terebinthifolius* (H), *Tecoma stans* (I) y *Tipuana tipu* (J).

b. Densidad estomática

Las especies que presentaron mayor número de estomas por mm² de área foliar fueron, *Koelreuteria paniculata*, *Delonix regia* y *Tipuana tipu*, en el caso de *Hibiscus tiliaceus* debido a la alta densidad de tricomas que presentó su envés, no fue posible realizar una adecuada impresión de su superficie. Las especies que presentaron la menor cantidad de estomas fueron *Schinus molle*, *Tecoma stans* y *Ceiba speciosa* (Figura 4.24).

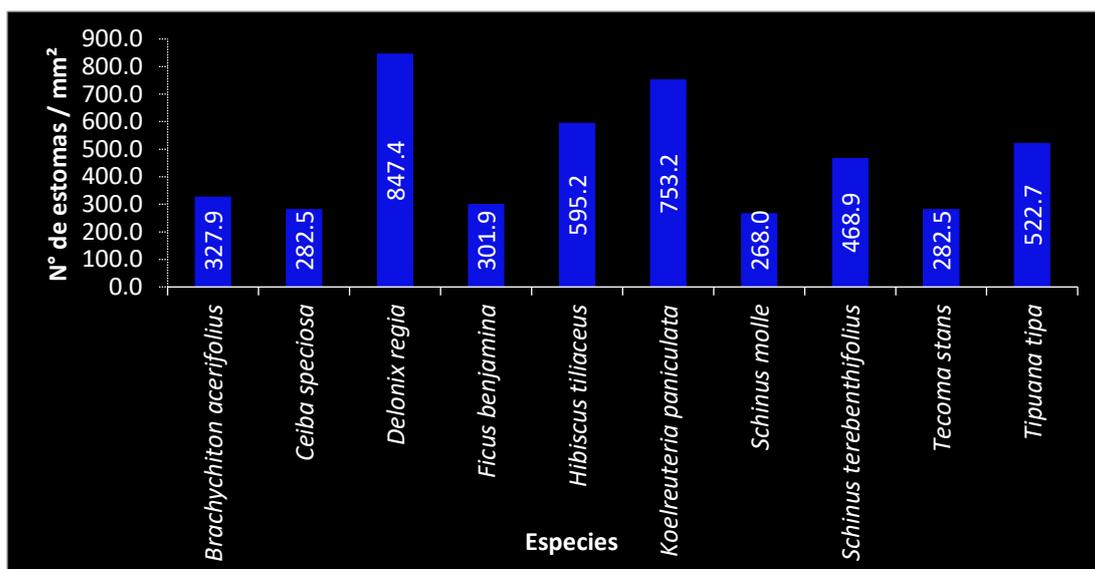


Figura 4.24: Número de estomas por mm² de superficie foliar.

4.7.3. Asociación de caracteres funcionales

El análisis clúster (Figura 4.25) muestra que en base a la similitud de los valores de los caracteres funcionales, las especies se asocian en 5 grupos diferentes, siendo *Ficus benjamina* y *Koelreuteria paniculata* las especies que no se asocian a ninguna otra y forman un grupo propio cada una, los caracteres funcionales de estas dos especies presentan valores muy distintos a las otras especies; *Schinus terebinthifolius*, *Tipuana tipu*, *Schinus molle* y *Delonix regia*, conforman el grupo más grande, todas estas especies comparten valores similares de caracteres funcionales. El grupo conformado por *Ceiba speciosa* y *Tecoma stans* es un grupo muy particular pues ambas especies están adaptadas a ecosistemas áridos, finalmente el quinto grupo lo conforman *Hibiscus tiliaceus* y *Brachychiton acerifolius*, las cuales son especies de hoja simple que pertenecen a la familia Malvaceae.

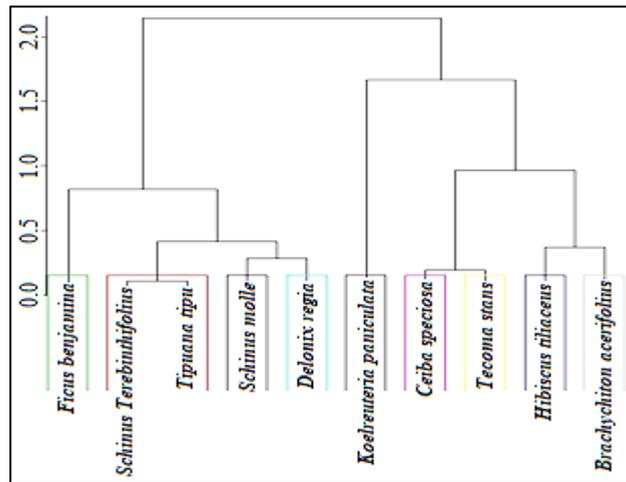


Figura 4.25: Clúster de agrupación de especies

El análisis de componentes principales de las especies (Figura 4.26), señala que existen tres grupos de especies que presentan caracteres funcionales similares entre sí. El grupo conformado por *Brachychiton acerifolius*, *Ceiba speciosa*, *Tecoma stans* e *Hibiscus tiliaceus* presenta caracteres funcionales opuestas al grupo integrado por *Schinus molle*, *S. terebinthifolius*, *Tipuana tipu* y *Ficus benjamina* y el tercer grupo lo conforman *Delonix regia* y *Koelreuteria paniculata* forman otro grupo.

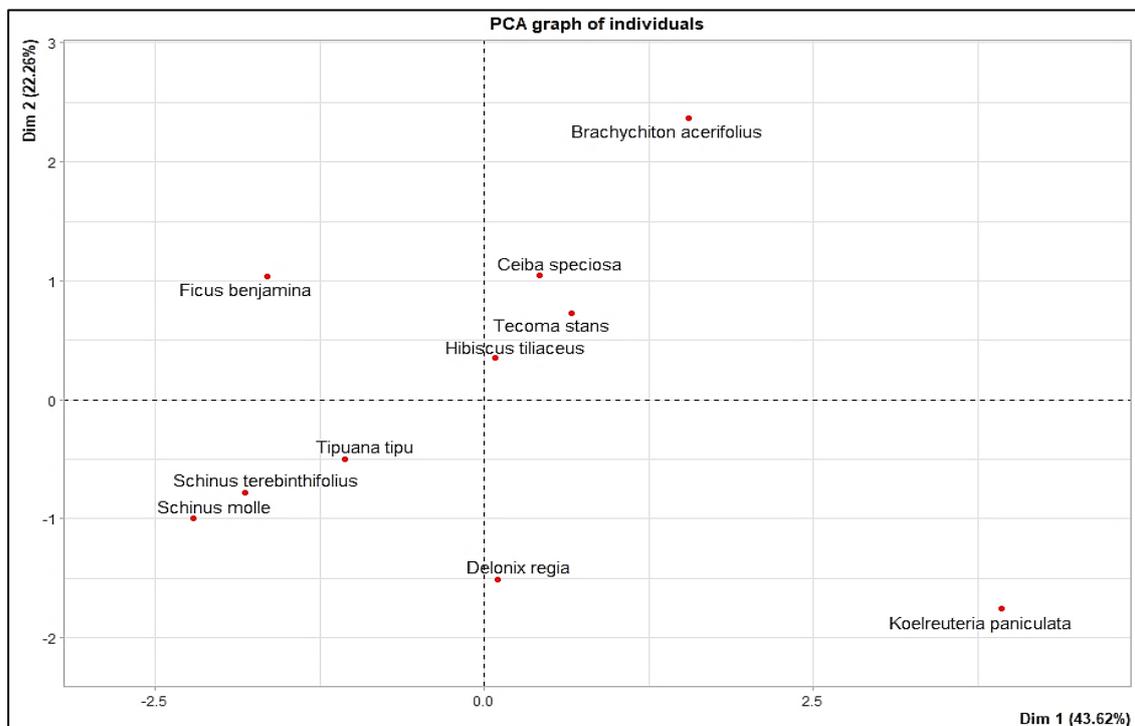


Figura 4.26: Análisis de componentes principales (ACP).

Los círculos de correlaciones (Figura 4.27) muestra que los caracteres funcionales se relacionan y ordenan en tres grupos diferentes, siendo la cobertura de venas, rugosidad foliar, longitud del peciolo y área foliar específica caracteres funcionales que tienen una relación directa alta y conforman el primer grupo, el grosor de hoja no tiene relación directa con ningún otro carácter, al contrario tiene una relación inversa con la longitud del peciolo, el tercer grupo está conformado por el área y la masa seca foliar ambos caracteres están altamente relacionados.

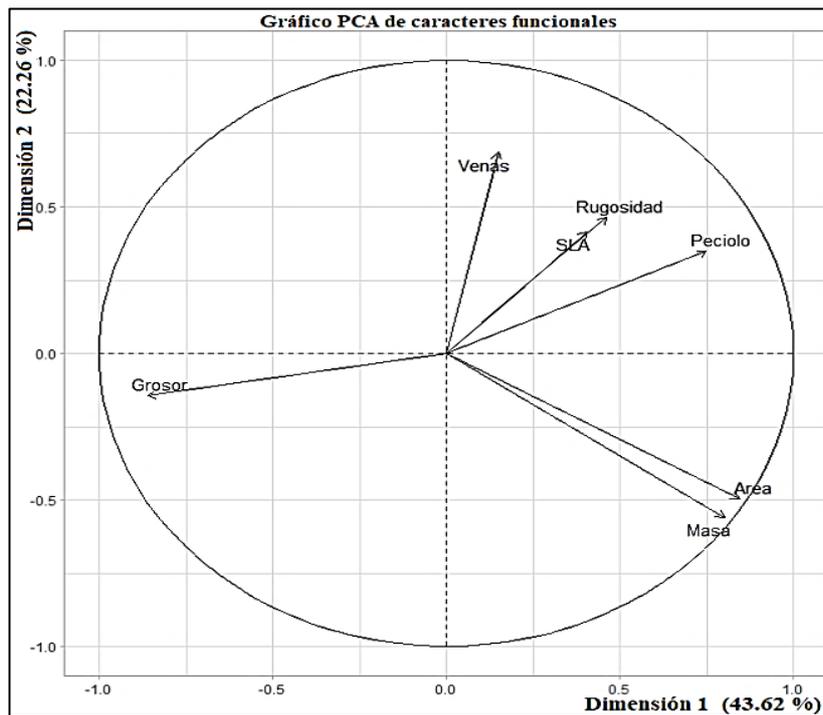


Figura 4.27: Círculo de correlación de los caracteres funcionales evaluados.

A partir de la sobreposición (Figura 4.28) de los gráficos anteriores, resultó que los caracteres funcionales que agrupan a *Brachychiton acerifolius*, *Ceiba speciosa*, *Tecoma stans* e *Hibiscus tiliaceus*, son la cobertura de venas, rugosidad foliar, longitud del peciolo y área foliar específica, por otro lado, el grosor de la hoja es el principal carácter funcional que agrupa a las especies *Schinus molle*, *S. terebinthifolius* y *Tipuana tipu* debido a que *Ficus benamina* está muy próximo a este carácter, fue incluido a este grupo. Los caracteres funcionales que hacen que *Koelreuteria paniculata* y *Delonix regia* sean diferentes a las demás especies son el área y masa foliar.

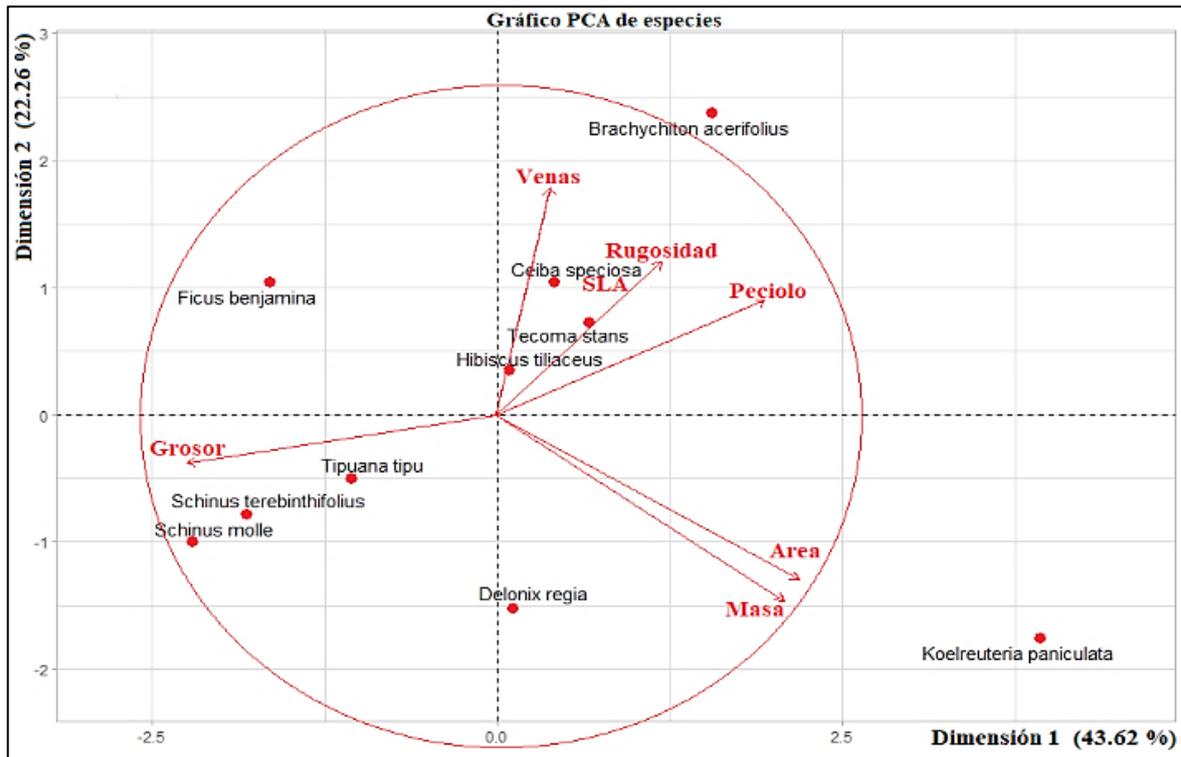


Figura 4.28: Sobre posición de los gráficos ACP con el de Círculo de Correlaciones.

4.7.4. Caracteres funcionales en la reserva de carbono

EL diámetro del tronco, la altura total del árbol, así como la densidad de la madera son caracteres que influyen en la reserva de carbono en los árboles. En el presente estudio destacamos a *Tipuana tipu* (22.071 t), *Cedrela odorata* (14.837 t), *Eucalyptus longifolia* (13.087 t), *Eucalyptus globulus* (6.803 t) y *Araucaria columnaris* (6.431 t) por presentar valores altos en estos caracteres y por consiguiente fueron las especies más eficientes en almacenar carbono. Por otro lado, estas especies también resaltan por el número de individuos, pues no necesariamente fueron las más numerosas (ver Figura 4.5) sobre todo *Araucaria columnaris* y *Eucalyptus globulus* que representadas con 8 individuos cada una, se encuentran entre las primeras 5 especies en presentar la mayor reserva de carbono. La cantidad de carbono almacenado en los árboles del campus de la PUCP, evidencia que las áreas verdes en la ciudad pueden ser un importante sumidero de carbono.

4.7.5. Caracteres funcionales en la retención de MP suspendido

La capacidad que tienen los árboles para retener el material particulado, fue demostrada en muchos estudios realizados por Nowak *et al.* (2006), Terzaghi *et al.* (2013), Hotman *et al.* (2014), Chen *et al.* (2017), Egas *et al.* (2018) entre otros. Todos estos autores recomiendan

el uso de especies arbóreas como indicadores de calidad de aire, también concluyen que la eficiencia de retención de MP, varía entre especies debido principalmente a las características morfo-anatómicas de la hoja en cada especie. Los resultados obtenidos en este trabajo también demuestran que, la eficiencia de la capacidad de retener MP por las 10 especies evaluadas, está determinada por caracteres funcionales como el grosor de hoja, longitud del peciolo, área foliar, densidad estomática.

Las hojas gruesas retuvieron mayor cantidad de MP, una hoja más gruesa ofrecerá más resistencia a ser agitada por el viento, generando así pequeños remolinos en la superficie foliar, y junto a la rugosidad facilitarán la deposición de material particulado Beckett *et al.* (2000). Por otro lado, un mayor grosor de la hoja permite a los árboles urbanos tolerar el ozono troposférico Bennett *et al.* (1992) y Ferdinand (1997).

En cuanto a la longitud del peciolo, se observó que aquellas especies con peciolo largo, acumularon menor cantidad de MP, debido a que un peciolo muy alargado genera inestabilidad a la lámina foliar, Vogel (1989) midió el arrastre y observó cambios en la configuración de las hojas sometidas a la fuerza del viento y concluyó que las hojas acuminadas y de peciolo corto, ofrecen resistencia, a diferencia de aquellas especies de hojas lobuladas y peciolo largo que eran deformadas con facilidad. En ese sentido Leonard *et al.* (2016) mencionan que, existen algunos caracteres funcionales como la longitud del peciolo que limitan la acumulación de MP sobre las hojas.

Los resultados señalan que *Koelreuteria paniculata* y *Delonix regia* fueron las especies que tuvieron mayor área foliar, pero su capacidad de retener MP fue reducida, en cambio las especies que tuvieron área foliar pequeña como *Ficus benjamina* y *Schinus molle* fueron las que retuvieron mayor cantidad de MP, ello podría ser explicado con la afirmación de otros investigadores quienes mencionan que el área foliar es uno de los caracteres que más influye en la capacidad de retención de MP, y dependiendo a su microestructura y a la combinación con otros caracteres funcionales, esa capacidad se verá favorecida o reducida Alcalá *et al.* (2010), Sæbø *et al.* (2012) y Leonard *et al.* (2016). Por otro lado, el círculo de correlaciones obtenido en el análisis de componentes principales, mostró que los caracteres funcionales que agrupaban a *Koelreuteria paniculata* y *Delonix regia* fueron el área y masa foliar, también se observó que estos dos caracteres se relacionan inversamente al grosor de la hoja.

Las especies que retienen mayor cantidad de MP fueron *Tipuana tipu*, *Schinus molle* y *Ficus*

benjamina, se observó que el carácter funcional que agrupa a estas especies en el círculo de correlaciones, fue el grosor de hoja. En tal sentido, el grosor de hoja es un carácter funcional que favorece a la retención de MP. El grosor se relaciona inversamente a la longitud del peciolo, rugosidad y al porcentaje de área ocupada por las venas en la hoja, a partir de ello se afirma que el grosor de hoja será un carácter funcional que contribuya a la retención de MP siempre y cuando tenga un peciolo corto, una menor rugosidad y cobertura de venas.

Los caracteres funcionales que agrupan a las especies que retuvieron menor cantidad de material particulado fueron, la longitud del tallo, la rugosidad de la superficie de la hoja y la cobertura de venas, la combinación de estos caracteres agrupó a *Ceiba speciosa*, *Hibiscus tiliaceus* y *Tecoma stans*. Un caso particular ocurrió con *Brachychiton acerifolius*, pues a pesar de pertenecer a este grupo, fue una especie que retuvo mayor cantidad de MP. Podría estar participando otro carácter funcional que no fue considerado, y en combinación con la rugosidad principalmente, estarían favoreciendo la retención de MP.

En cuanto a la densidad estomática Liu *et al.* (2012), Chen *et al.* (2017), Egas *et al.* (2018) entre otros, consideran que los estomas favorecen la retención de MP, mencionan que la cantidad de MP se verá favorecida con el número y el tamaño de estos. Las especies que retuvieron mayor cantidad de MP por hoja, favorecidas por este carácter, fueron *Koelreuteria paniculata*, *Delonix regia* y *Tipuana tipu*.

V. CONCLUSIONES

1. Para conocer la composición arbórea presente en las 14 h de área verde de la PUCP, se realizó un registro general de los árboles, a partir del cual se llegó a determinar 108 especies arbóreas, de las cuales el 72.3 % son introducidas. La distribución de individuos por especie fue irregular, existiendo especies muy numerosas como *Archontophoenix alexandrae*, y otras raras como *Macadamia ternifolia*. Los árboles de mayor tamaño como *Eucalyptus globulus* sobrepasaron los 20 m de altura y el diámetro más grande corresponde a *Ceiba trichistandra*. La alta diversidad de esta comunidad arbórea, constituye una muestra interesante de especies de flora del Perú y del mundo, así como también, es un importante material didáctico de enseñanza, y contribuye al catálogo de especies presentes en la ciudad de Lima.
2. Conocer los valores dasométricos de los árboles y palmeras, permitió estimar la biomasa aérea, llegándose a estimar 291.695 t, almacenada en los 1268 individuos arbóreos de la PUCP, siendo *Tipuana tipu* (22.071 t), *Cedrela odorata* (14.837 t) y *Eucalyptus longifolia* (13.087 t) las especies que almacenan mayor cantidad de biomasa. El uso de una ecuación específica para la familia Arecaceae evitó sobreestimar la biomasa que almacena esta familia. A partir de la biomasa se estimó 145.847 t de carbono almacenado en estos árboles.
3. La capacidad de retener material particulado a partir de la estructura arbórea de la PUCP, fue evidenciada a través de las estimaciones realizadas en este proyecto, y son una aproximación inicial a los múltiples beneficios que brindan los árboles en una ciudad. En ese sentido, se logró conocer que las especies que retuvieron mayor cantidad de material particulado (g/m^2 de área foliar) fueron, *Ficus benjamina*, *Tipuana tipu*, *Brachychiton acerifolius* y *Schinus molle*. Los resultados obtenidos podrían llegar a ser más significativos en aquellos lugares que presenten una alta concentración de MP.

4. Evaluar las estrategias ecológicas de los árboles a través de la cuantificación de sus caracteres funcionales, permitió conocer y diferenciar a las especies que presentan los caracteres más idóneos para almacenar carbono y retener material particulado. En ese sentido, las especies que alcanzaron valores promedios altos de altura y DAP fueron *Araucaria columnaris*, *Eucalyptus globulus* y *Cedrela odorata*. La combinación de estos caracteres y sumados a ellos la densidad de madera permitieron diferenciar a las especies más idóneas para el almacenamiento de carbono. En cuanto a los caracteres funcionales de las hojas, el grosor de hoja presentó una relación inversa con la longitud del peciolo y el área foliar. En base a ello, se afirma que aquellas especies que presenten un mayor grosor de hoja, un peciolo corto y una menor área foliar, será la combinación de caracteres funcionales idóneos para una eficiente retención de material particulado.

VI. RECOMENDACIONES

1. Desarrollar un monitoreo periódico del diámetro y altura de los árboles, permitirá tener una mayor aproximación a la cantidad de carbono secuestrado en un tiempo determinado, para ello se deben programar, en lo posible censos bienales.
2. Considerar el valor funcional sobre el valor estético de los árboles, permitirá reconocer el valor real de los árboles en los ecosistemas urbanos y desarrollar las ciudades en base a este valor funcional, será una estrategia de adaptación al cambio climático.
3. Para la cuantificación de la biomasa almacenada se sugiere utilizar una ecuación alométrica específica para las palmeras, así se evitará sobrevalorar el resultado. En cuanto a la ecuación alométrica para árboles se recomienda utilizar la ecuación que considera el DAP, la altura y la densidad de madera de esta manera se tendrá una mejor estimación. Por otro lado, si se busca potenciar más la captura de carbono, se recomienda priorizar árboles sobre las palmeras.
4. Se recomienda extender la cuantificación del material particulado retenido en otras especies, pues cada especie presenta caracteres funcionales diferentes. Así se tendrán más opciones a la hora de elegir las especies. Se recomienda usar especies nativas, de esta manera se promoverá la biodiversidad de la fauna local.
5. Si el objetivo es potenciar la retención de material particulado en las hojas, se recomienda elegir especies con mayor grosor de hoja, un peciolo corto y una menor área foliar. Esta combinación de caracteres funcionales, permitirá una mayor retención.
6. Finalmente se recomienda realizar el muestreo de material particulado en los meses de verano para de esta manera, conocer la dinámica de retención temporal y del mismo modo, se recomienda replicar la metodología en más lugares de la ciudad de Lima, para conocer la dinámica de retención espacial.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC.es. 2008. Carbono, elemento base en la química de la vida. Hemeroteca. Obtenido de https://www.abc.es/hemeroteca/historico-28-06-2008/abc/Sociedad/carbono-elemento-base-en-la-quimica-de-la-vida_1641966849752.html

Acero, JA., Moral, AS. & Arrizabalaga, J. 2014. Influencia de la vegetación en la calidad del aire y el clima urbano. Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA. Comunicación técnica. 3-13.

AirVisual. 2018. World air quality report – Region & city PM2.5 Ranking. IQAir, 22, 7-8.

Alcalá, J., Rodríguez O., Hernández, A. & Tapia, J. 2010. Potencial de retención de polvo atmosférico en tres especies vegetativas del ecosistema semiárido, San Luís Potosí, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(2), 93-99.

Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Quintana, A., Campos, A. & Holguín, C. 2008. Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: Ciudad de Chihuahua. *MULTEQUINA*, (17), 17-28.

Alcalá, L. 2007. “Dimensiones urbanas del problema habitacional. El caso de la ciudad de Resistencia, Argentina”. *Boletín del Instituto de la vivienda INVI*, 22 (59), 35-68.

Alegre, V., Mejía, M., Vásquez, L. & Espinoza. 2007. Determinación de la capacidad de adsorción de material particulado en el aire de tres especies arbóreas en 2 avenidas principales en el distrito de Cercado de Lima. Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria la Molina. 132.

American Forest 2007. Leading on Climate Change Solutions. Obtenido de <https://www.americanforests.org/why-it-matters/climate/>

Angeoletto, F. 2012. Planeta Ciudad: Ecología Urbana y Planificación de Ciudades Medias de Brasil. 2012. Tesis doctoral. Doctorado en Ecología y Medio Ambiente – Universidad Autónoma de Madrid. 1-306.

- Andina. 2019. Magdalena hará censo de árboles para promover preservación de áreas verdes. Agencia peruana de noticias. 21/oct. Obtenido de <https://andina.pe/agencia/noticia-magdalena-hara-censo-arboles-para-promover-preservacion-areas-verdes-770364.aspx>
- Angulo, CAA. 2018. Capacidad de adsorción de material particulado de la especie arbórea *Ficus benjamina* en el parque zonal Mayta Capac, San Martín de Porres. Tesis Pregado, Universidad Nacional Federico Villareal. 172.
- APUFM (Asia Pacific Urban Forestry Meeting). 2016. 1ra reunión de silvicultura urbana de Asia y el Pacífico. Zhuhai-República Popular de China.
- Beckett, P., Freer-Smith PH. & Taylor G. 2000. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites, *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 24: 209-230.
- Bediaf, H., Sabre, R., Journaux, L., & Cointault, F. 2015. Comparison of leaf surface roughness analysis methods by sensitivity to noise analysis. *Biosystems Engineering*, 136, 77-86.
- Benedict, M. & McMahon, E. 2002. *Green Infrastructure*. Washington: Island Press,
- Bennett, JP., Rassat, P., Berrang, P. & Karnosky, DF. 1992. Relationships between leaf anatomy and ozone sensitivity of *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. and *Prunus serotina* Ehrh. *ELSEVIER*. 32(1): 33-41.
- Bonilla, E. 2009. Lima y el Callao: Guía de arquitectura y paisaje Lima: Universidad Ricardo Palma. 1 - 476 p.
- Bromley, J. 2019. Las calles viejas de Lima. Municipalidad Metropolitana de Lima. 103-130.
- CAF (Corporación Andina de Fomento). 2011. Desarrollo urbano y movilidad en América Latina. Obtenido de <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/419>.
- Carrillo, MA., Viguera, AL. & Portillo L. 2014. Observaciones sobre el comportamiento de estomas en plantas suculentas. Departamento de Botánica y Zoología – Universidad de Guadalajara. *Bol. Nakari*, 25(2),27-30

Casado, I. 2010. Apuntes sobre el origen y la historia de la ciudad, en Contribuciones a las Ciencias Sociales. Obtenido de www.eumed.net/rev/cccss/07/icg2.htm.

Casanoves, F., Pla, L. & Di Rienzo, J. 2011. Valoración y análisis de la diversidad funcional y su relación con los servicios ecosistémicos. CATIE. Informe técnico Nro. 384.

Cerón, CE. 2003. Manual de Botánica Sistemática, Etnobotánica y Métodos de estudio en el Ecuador. Herbario “Alfredo Paredes” QAP. Escuela de Biología de la Universidad Central del Ecuador, En: Paucar Buñay, M.G. 2011. Composición y estructura de un bosque montano, sector Licto, Canton Papate. 56 p.

Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, MA., Chambers, JQ., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, JP., Nelson, BW., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B. & Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*. 145: 87–99.

Chave, J. 2002. Medición de densidad de madera en árboles tropicales. Manual de campo. PAN-AMAZONIA. 1-7.

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(3206), 1-11.

Chipoco, JG. & Valencia, 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. Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria la Molina. 111.

Cobo, B. 1890. Historia del nuevo mundo. 268, 117-120

Contreras, AM., García, G. & Icaza, B. 2013. Calidad del aire: una práctica de vida. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 28, 5-10.

Coselman, KE., Navas-Acien, A. & Kaufman, JD. 2015. Environmental factors in cardiovascular disease. *Nature Reviews Cardiology*, 12(11), 627–642.

Costa, M & Plumed, J. 2016. La arboleda monumental, Monografías botánicas. Universidad de Valencia. 3, 40-44.

Dalmasso, A., Candia, R. & Llera, J. 1997. La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. Gobierno de Mendoza, Facultad de Ciencia Agrarias, Lujan-Mendoza. MULTEQUINA, (6), 91-97.

Defensoría del Pueblo. 2005. Informe defensorial No. 116. La calidad del aire en Lima y su impacto en la salud y vida de sus habitantes. Obtenido de <https://elperuano.pe/noticia.aspx?id=5994>

Defensoría del Pueblo. 2010. Áreas verdes y espacios públicos en Lima.

Díaz, S., Fargione, J., Stuart, C. & Tilman, D. 2006. Biodiversity los threatens human well-being. PLoS Biol. 4(8): e277, 1301.

Dzierżanowski, k., Popek, R., Gawrońska, H., Saebo, A. & Gawroński, S. 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.

.EDU. 2015. Conoce más sobre el plan de renovación de los jardines de la PUCP. Obtenido de <https://puntoedu.pucp.edu.pe/galerias/conoce-mas-sobre-el-plan-de-renovacion-de-los-jardines-de-la-pucp/>

Egas, C., Naulin, PI. & Préndez. M. 2018. Contaminación urbana por material particulado y su efecto sobre las características morfo-anatómicas de cuatro especies arbóreas de Santiago de Chile. Información tecnológica. 29(4), 111-118.

EIU (Economist Intelligence Unit). 2010. Índice de Ciudades Verdes en América Latina, Una evaluación comparativa del impacto ecológico de las principales ciudades de América Latina. Siemens, Publicis Publishing.

EPA (Environmental Protection Agency). 1996. Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA. Vol. 1(2), 1-34.

EPA (Environmental Protection Agency). 2004. Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA. Vol. 2(6), 1-20.

EPA (Environmental Protection Agency). 2006. How air pollutions affect the view. Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, NC 27711, EPA-456/F-06-001.

Estupiñán, N., Scorcia, H., Navas, C., Zegras, C., Rodríguez, D., Vergel-Tovar, E., & Vasconcellos, E. 2018. Transporte y Desarrollo en América Latina. 1 (1), 113-120.

European Commission & WHO (World Health Organization). 2002. Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies. WHO and JRC Expert Task Force meeting. 206, 44-51.

Fearnside, PM. 1997. Wood density for estimating forest biomass in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 90(1), 59–87.

Ferdinand, JA. 1997. Leaf Morphology and Physiology in Relation to Ozone Sensitivity of Black Cherry (*Prunus serotina* Ehrh.) Trees by Tree Size, Genotype, and Light Environment. MS thesis, Pennsylvania State University, PA, USA.

Ferreira, T. & Rasband, WS. 2010. “ImageJ User Guide — IJ 1.46”. Obtenido de imagej.nih.gov/ij/docs/guide/, 2010–2012

Figuerola, ME. & Rojo. MT. 2009. La palmera, símbolo de poderío o contribución al sistema verde en un escenario de cambio climático. Universidad Internacional de Andalucía Arte y Pensamiento. 1-10

Flores, E. 1999. La planta. Estructura y función. Vol I. Libro Universitario Regional (LUR). Costa Rica.

Frangi, J. & Lugo, A. 1985. Ecosystem Dynamics of a Subtropical Floodplain Ecological Society of America, Estados Unidos. 55 (3), 351-369.

Garcés, L. & Hernandez, M. 2004. La Lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*. 1(2), 67-72.

García, R., Miyashiro, J., Rubio, D., Santa Cruz, P. & Marces, R. 2015. Desarrollo o crecimiento urbano en Lima: el caso de los distritos del sur. *Perú Hoy*. 1- 25.

Gartner, B. 1995. *Plant Stems: Physiology and Functional Morphology*. 75-89.

Gill, S., Handley, J., Ennos, A. & Pauleit, S. 2007. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Build Environment*, Vol. 33, N° 1, p. 115-133.

Gonzales, A. 2018. Image J: una herramienta indispensable para medir el mundo biológico.

Folium relatos botánicos. 2018 (1), 1-6.

Goodman. RC., Phillips. OL., Del Castillo. D., Freitas. L., Tapiaa. S., Monteagudo. A. & Baker. TR. 2013. Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, ELSEVIER 310 (2013), 994-1004.

Grimm, NB., Faeth, S., Golubiewski, N., Redman, Ch., Wu, J., Bai, X. & Briggs, J. 2008. Global change and the ecology of cities. *Science*, 319 (5.864), 756-760.

Hamann, J. 2011. El nacimiento de Lima: La imposición de un nuevo orden. *Revistes Científiques de la Universitat de Barcelona*. 19: 23-37.

Hernández, R., & Fernández Collado, C. 1998. *Metodología de la investigación*. México: McGraw-Hill.

IDEAM (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales. 2012, Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2007-2010. Comité de comunicaciones y publicaciones. 311, 27.

IMP (Instituto Metropolitano de Planificación). 2010. Inventario de áreas verdes a nivel metropolitano de Lima. 1-46.

INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). 2017. Informe Nacional de Calidad del Aire 2016, México. Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos. Ciudad de México.

INEI (Instituto Nacional de Estadísticas Ambientales). 2019. Anuario de estadísticas ambientales. Dirección general de cuencas nacionales. 607, 153-160.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Directrices del IPCC DE 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero Vol 4. VIII, 8.10.

Leonard, RJ., McArthur, C. & Hochuli, DF. 2016. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 20, 249–253.

León, WJ. 2001. Crecimiento del árbol. Tejidos del tallo adulto. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Departamento de Botánica, Cátedra de anatomía de maderas. 5-10

León, WJ. 2010. Anatomía y densidad o peso específico de la madera. Universidad de los Andes, Revista Forestal Venezolana, Año XLIV, Volumen 54(1), 67-76.

Liu, L., Guan, D., & Peart, M. R. 2012. The morphological structure of leaves and the dust-retaining capability of afforested plants in urban Guangzhou, South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(8), 3440–3449.

Marcos, R., Cabrera, M., Laos, H., Mamani, D. & Valderrama, A. 2008. Estudio comparativo para la determinación del polvo atmosférico sedimentable empleando las metodologías de tubo pasivo y de placas receptoras en la ciudad universitaria de San Marcos. Obtenido de [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev_cedit/2008_V03/pdf/a06v3 .pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/publicaciones/rev_cedit/2008_V03/pdf/a06v3.pdf)

McPherson, EG., VanDoorm, NS. & Peper, PJ. 2016. Urban tree database and allometric equations. *United States Department of Agriculture*. 92, 56-83.

MEA (Millennium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and human well being*. (2), 25-123.

Mella, JM. 2003. *El medio ambiente urbano en España*. Thomson-Civitas. Madrid.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2011. *Compendio de la legislación ambiental peruana*. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental del Ministerio del Ambiente. 1 (5), 282-283.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2012. *Informe Nacional del Estado del Ambiente 2009-2011*. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental. 295, 13.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014a. *Informe Nacional del Estado del Ambiente, 2012-2013*. 326: 160-170.

MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014b. *Ciudades sostenibles*. Conferencia de las naciones unidas sobre el cambio climático, Lima COP20.

- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2014c. Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014. Viceministerio de Gestión Ambiental. 52, 12.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). 2019. Avance: Plan de acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima y Callao. Comisión multisectorial para la gestión de la iniciativa del aire limpio para Lima y Callao. 95, 61-75.
- Ministerio del Medio Ambiente. 2016. Guía de Calidad del Aire y Educación Ambiental. División de Educación Ambiental y Participación Ciudadana-Chile. 103. 7-17
- Municipalidad Metropolitana de Lima. 2014. Ordenanza para la conservación y gestión de áreas verdes en la provincia de Lima. El Peruano; 28/dic: 493-502
- Negro, S. 2009. La plaza mayor de Lima, el ocaso de un símbolo. Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio (CICOP-PERÚ). 1-23.
- Nowak, D., Crane, D. & Stevens. J. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United State. ELSEVIER 4 (2006), 115-123.
- Nowak, D., Hirabayashi, S., Bodine, A. & Greenfield, E. 2014. Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. ELSEVIER 193 (2014):119-129.
- Odum, E. & Barrett, G. 2006. Fundamento de ecología. CENGAGE Learning. 596, 310-311.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 1996. Conferencia de las naciones unidas sobre los asentamientos humanos: HABITAT II. Estambul, 1-258.
- Pacsi, SA. 2016. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM10 y PM2,5 en Lima Metropolitana. En: 150 Anales Científicos, Universidad Nacional Agraria La Molina. N° 77 (2), 273-283 (2016).
- PAOT (Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal). 2003. Manejo y Conservación de Áreas Verdes. En Informe Anual, Apéndice Temático.
- Pasini, D & Mirjalili, V. 2006. The optimized shape of a leaf petiole. WIT Transactions on Ecology and the Environment. WIT Press. 87,1-11.
- Pearlmutter, D., Calfapietra, C., Samson, R., O'Brien, L., Krajter, S., Sanesi, G. & Del Amo, R. 2017. The Urban Forest. Cultivating green infrastructure for people and Environment.

Springer. Vol. 7, 4.

Harguindeguy, N., Diaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret-Harte, M., Cornwell, W., Craine, J., Gurvich, D., Urcelay, C., Veneklaas, E., Reich, P., Poorter, L., Wright, I., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J., De Vos, A. & Van der Heijden, M. 2013. Nuevo manual para la medición estandarizada de caracteres funcionales de plantas. *Pérez Australian Journal of Botany*. (61): 167-234.

Perú 21. 2017. El parque vehicular y combustibles son los grandes responsables de la contaminación (en línea, entrevista). Obtenido de. <https://peru21.pe/peru/parque-vehicular-combustibles-son-grandes-responsables-contaminacion-senala-experto-380009>.

Phillips, O., Baker, T., Feldpausch, T. & Brienens, R. 2016. Manual de Campo para el Establecimiento y la Remedición de Parcelas. RAINFOR. 1-28.

PNUMA (Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente). 2001. Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Obtenido de <http://www.unep.org/maweb/es/About.aspx#13>

PPMC (Paris Process on Mobility and Climate). 2015. Renewable Energy and Transport- Decarbonising fuel in the transport sector. Preliminary análisis of INDCs. 1-15.

Priego, C. 2002. Beneficios del arbolado urbano. Ensayo Doctorado. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano>.

Proyecto Madidi., Herbario Nacional de Bolivia., Missouri Botanical Garden. & Universidad Autónoma de Madrid. 2012. Protocolo para la medición de características funcionales. Proyecto Inventario Florístico de la Región Madidi.

Rangel, JO. & Velásquez, A. 1997. Métodos de estudio de la vegetación. Universidad Nacional de Colombia. 59-88.

Rivas, D. 2000. ÁRBOLSIG: Sistema de Información Geográfica para árboles urbanos. Obtenido de http://www.rivasdaniel.com/Articulos/proyecto_1027.pdf

Rogers, R. 1997. *Cities for a Small Planet*. London: Faber and Faber, 177: 10-25

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. *Science of The Total Environment*, 427-428, 347–354.

Sánchez, OR. & Ordoñez, CG. 2016. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2015. MINAM & SENAMHI. Dirección de meteorología y evaluación ambiental atmosférica.

Seinfeld, JH. & Pandis, SN. 2006. *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons 2, 588-615.

SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). 2008a. Evaluación de la Contaminación Atmosférica en la Zona Metropolitana de Lima-Callao mayo 2008. Lima, Perú. Recuperado de: http://www.senamhi.gob.pe/pdf/bolHidro_ambiente.pdf

SINIA (Sistema Nacional de Información Ambiental). 2016. Vehículos por cada mil habitantes. Obtenido de <https://sinia.minam.gob.pe/indicador/966>

Smaniotto, C., Suklje, I. & Mathey, J. 2008. Green spaces—a key resources for urban sustainability. *The Green Key approach for developing green spaces*. *Urbani izziv*, 19(2), 199-211.

Solari, S. & Servicio de parques de Lima (SERPAR). 2012. Árboles en Lima. Gráfica Biblos. 1-172.

Stephenson, NL., Das, AJ., Condit, R., Russo, SE., Baker, PJ., Beckman, NG., ..., Zavala, MA. 2014. Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507(7490), 90–93.

Szumacher, I. & Malinowska, E. 2013. Servicios ecosistémicos urbanos según el modelo de Varsovia. *Revista del CESLA*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=243329724005>.

Terzaghi, E., Wild, E., Zacchello, G., Cerebolini, B., Jones, K. & Di Guardo, A. 2013. Forest filter effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *ELSEVIER, Atmospheric Environment*. 74(2013), 378-384.

Thompson, W. 2002. Urban Open Space in the 21st Century. *Landscape and Urban Planning*, 60(2), 59-72.

United Nations Human Settlements Program UN-Habitat. 2011 Cities and climate change. Earthscan. (1), 1-16

Vallius, M. 2005. Characteristics and sources of fine particulate matter in urban air. Publications of the National Public Health Institute A6. Obtenido de. http://www.ktl.fi/attachments/suomi/julkaisut/julkaisusarja_a/2005/2005a6.pdf.

Vásquez, AE. 2016. Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile, *Revista de Geografía Norte Grande*, 63, 63-86.

Vélez, MC. 2010. Aspectos anatómicos del pulvínulo y nervio principal foliar de cinco especies del género *Canavalia* de Colombia, *Dioclea guianensis* y *Mucuna pruriens* (Fabaceae). Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle. *Ciencias* (14), 15-34.

Viana, M. 2003. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores Norte y Este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis para optar el grado de Doctor. Universidad de Barcelona. 376.

Vizcarra, M. 2006. La atmósfera contaminada y sus relaciones con el público. Segunda edición. Lima, Perú.

Vogel, S. 1989. Drag and Reconfiguration of Broad Leaves in High Winds. *Journal of Experimental Botany*, 40(8), 941-948.

WHO (World Health Organization). 2016. Urban green spaces and health: A review of evidence. Regional Office for Europe. 81, 21-31.

Wiemann, MC., & Williamson, GB. 1989. Wood Specific Gravity Gradients in Tropical Dry and Montane Rain Forest Trees. *American Journal of Botany*, 76(6), 924.

Wilches-Chaux, G. 2008. Ese océano de aire en que Vivimos. Origen, evolución, estado actual y futuros posibles de la atmósfera terrestre. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. 1-76

WBG (World Bank Group). 1999. Pollution Prevention and Abatement Handbook 1998: toward cleaner production. 551, 231-233.

Wurzler S., Reisin, TG. & Levin, Z. 2000. Modification of mineral dust particles by cloud processing and subsequent effects on drop size distributions. *Journal of Geophysical Research* 105, 4501-4512.

Young, RF. 2009. Interdisciplinary foundations of urban ecology. *Urban Ecosystems*, 12, p. 311-331.

VIII. ANEXOS

Anexo 1.-Factores que influyen en la capacidad de carga del medio receptor aire en Lima.

¹INEI. (2018). Precipitación total anual por departamento. Obtenido de <http://m.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/a1-condiciones-fisicas-10234/>

FACTORES	CONSECUENCIAS
Zona climática	Según la clasificación de Holdrige, la zona de vida en la que se encuentra la ciudad de Lima corresponde a, Desierto Basal Super Árido, con precipitaciones en forma de lloviznas ligeras entre abril y diciembre (media anual 11.1 mm) ¹ . La escasa precipitación no favorece la deposición húmeda de las partículas suspendidas y como consecuencia, la concentración de estas en la atmosfera será mayor ² .
Flujo de vientos	La cuenca atmosférica en la que se ubica la ciudad de Lima está influenciada principalmente por el anticiclón del pacífico sur y en asociación con la cordillera occidental, generan vientos del sur, los cuales aumenta la humedad relativa del aire y más aún en invierno (Defensoría del Pueblo, 2006) ³ . Esta cordillera presenta proyecciones que se extienden hacia la costa generando microcuencas, las cuales originan un estancamiento de los vientos, reduciendo su velocidad y modificando su dirección. Como consecuencia, la dispersión de las partículas suspendidas se ve interrumpida, incrementándose su concentración en la atmósfera ⁴ .
Parque automotor	Aproximadamente en Lima y Callao existen 1 752 919 vehículos, siendo la región que congrega al 66 % del parque automotor del Perú (La Cámara 2018) ⁵ . Esta alta concentración vehicular, incrementa las emisiones, originadas a partir del tubo de escape y el desgaste de frenos y neumáticos. Por estas emisiones, los vehículos constituyen fuentes móviles de emisión y según Rojas (2017) ⁶ señala que, para el año 2017, la emisión del PM _{2.5} y PM ₁₀ fue de 3 391 y 8 585 toneladas/año respectivamente.
Crecimiento urbano	La superficie urbana de Lima equivale a 85 853 ha y la velocidad con la que ha crecido entre el 2009 y 2018 fue de 907 ha/año, ahí se concentra aproximadamente un tercio de la población peruana (Zucchetti & Freundt, 2019) ⁷ . A mediados del siglo XX se inició la migración masiva hacia Lima, ocupando territorio mediante invasiones. Fue el centralismo y los problemas sociales, como el terrorismo, los que promovieron el desplazamiento de la población y el origen de nuevos asentamientos que constituyen nuevas fuentes de emisión mediante el transporte, la construcción, la industria entre otros (Zucchetti & Freundt, 2019).

² SENAMHI. (2011). Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011. MINAM. 56, 39-40.

³ Defensoría del Pueblo. (2006). La calidad del aire en Lima y su impacto en la salud y la vida de sus habitantes. Informe defensorial N°116. 82, 22.

⁴ Silva, J. & Montoya, Z. (2006). Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones meteorológicas predominantes en la zona metropolitana de Lima – Callao durante el año 2004. Acta Nova; (3)2.

⁵ La Cámara. (2018). Aumento continuo del parque automotor, un problema que urge solucionar. Comercio Exterior. Obtenido de https://apps.camaralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterior.pdf

⁶ Rojas. FJ. (2017). Modelación numérica del transporte de contaminantes y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana. Tesis de doctorado, Universidad Nacional Agraria La Molina.

⁷ Zucchetti. A. & Freundt. D. (2019). Ciudades del Perú, Primer reporte nacional de indicadores urbanos 2018. PERIFERIA & WWF. Ediciones Nova Print S.A.C. 148, 64-70.

Anexo 2.- Registro de individuos arbóreos en el campus de la PUCP.



Anexo 3.- Algunas flores y frutos de especies llamativas



Anexo 5.- Obtención del peso seco de las hojas muestreadas.



Anexo 6.- Mezcla obtenida a partir del lavado de las hojas colectadas.



Anexo 7.- Material particulado retenido por la membrana de teflón PTFE.



Anexo 8.- Medidor de área foliar láser portátil CI-202



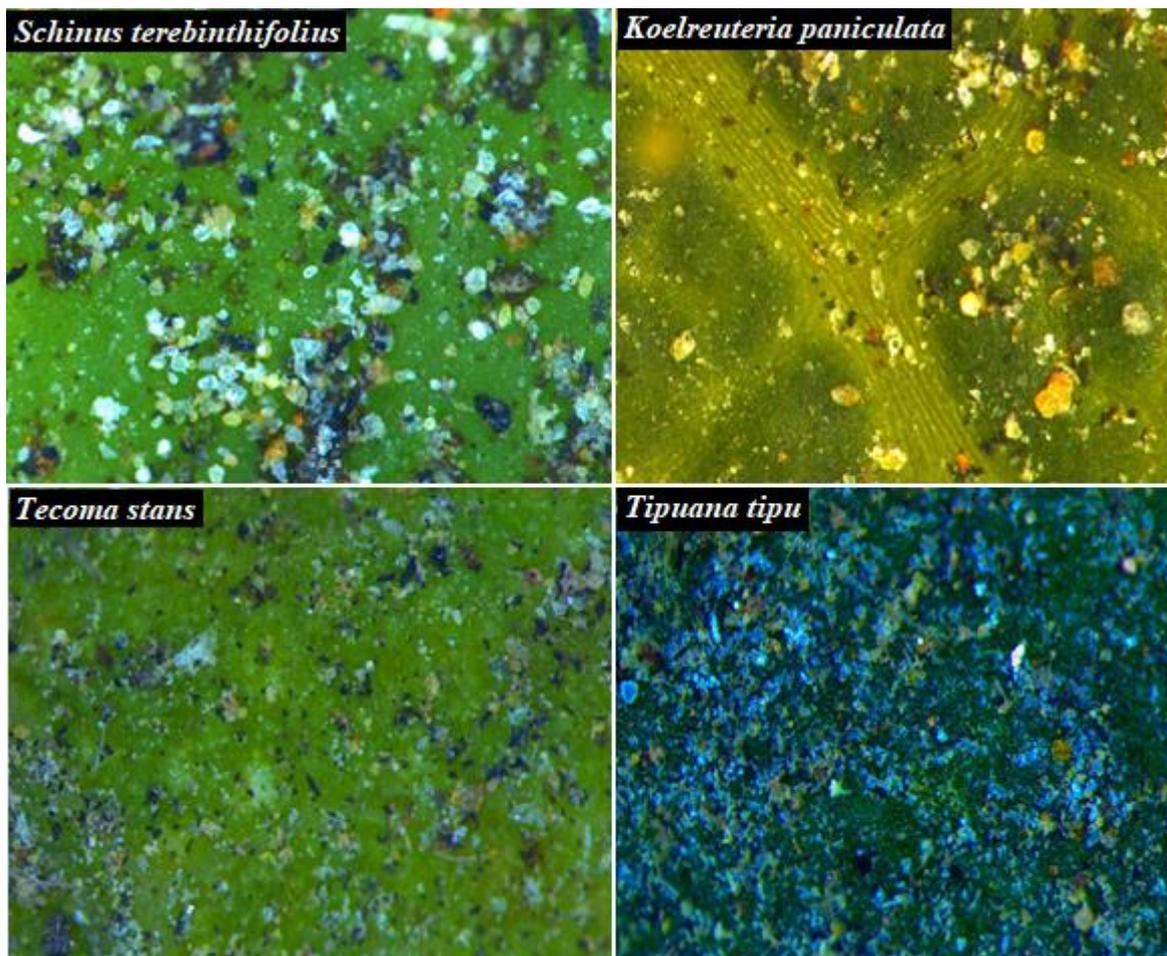
Anexo 9.- Placas receptoras instaladas en la azotea del Pabellón de Física.



Anexo 10.- Material particulado retenido por tricoma de *Delonix regia*.

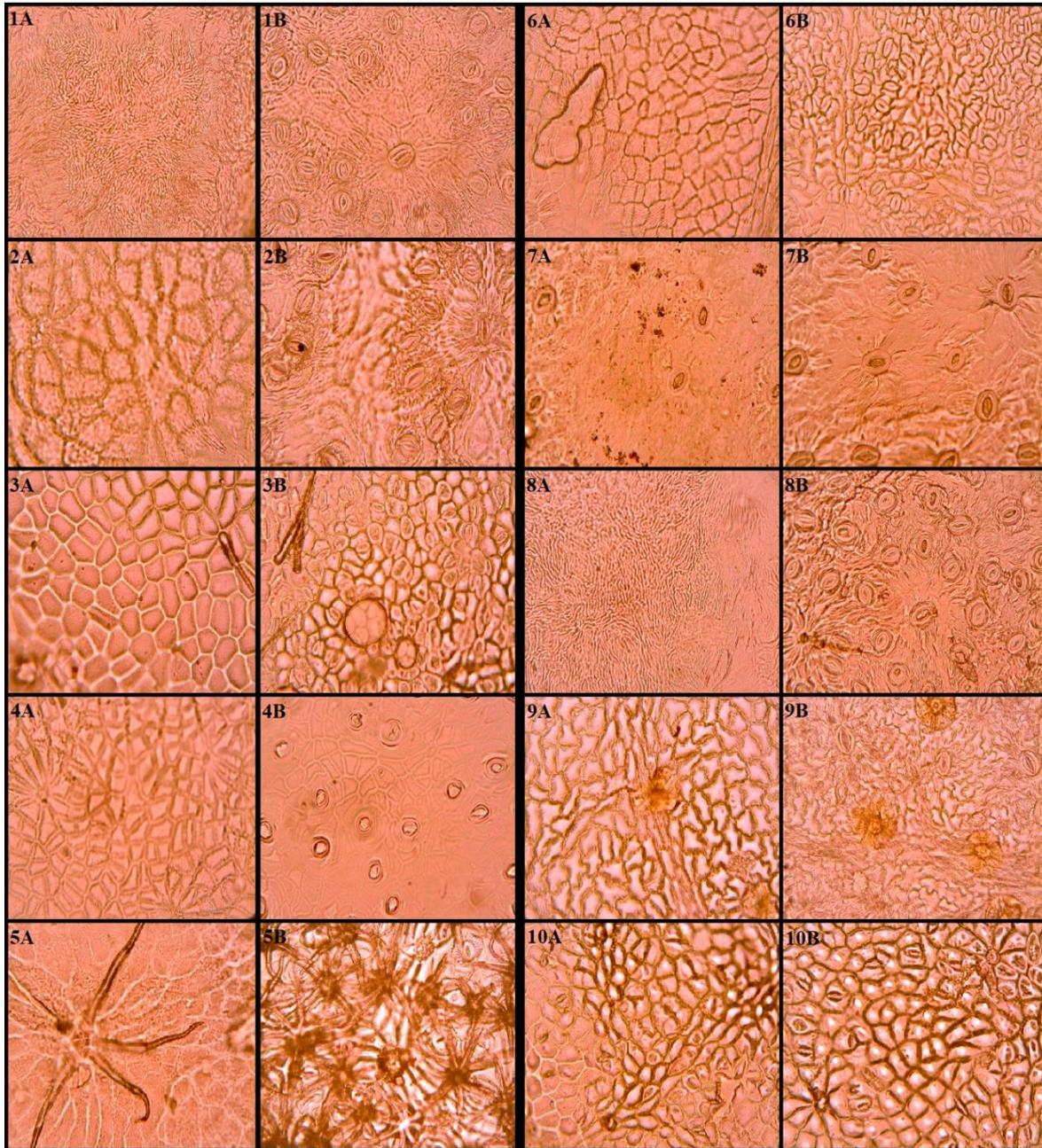


Anexo 11.- Material particulado retenido en la superficie de las hojas



Anexo 12.- Impresión de estomas A) haz y B) envés.

Brachychiton acerifolius (1), *Ceiba speciosa* (2), *Delonix regia* (3), *Ficus benjamina* (4), *Hibiscus tiliaceus* (5), *Koelreuteria paniculata* (6), *Schinus molle* (7), *Schinus terebinthifolius* (8), *Tecoma stans* (9) y *Tipuana tipu* (10).



Anexo 13.- Registro de las especies encontradas, procedencia y cantidad.

Familia	Nombre científico	Distribución	Origen	Nombre vulgar	Ind.
Adoxaceae	<i>Sambucus nigra</i>	América del norte y Europa	Exótico	Sauco	5
Anacardiaceae	<i>Loxopterygium huasango</i>	Perú y Ecuador	Nativo	Hualtaco	6
Anacardiaceae	<i>Schinus molle</i>	Perú	Nativo	Molle	39
Anacardiaceae	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Brasil, Paraguay y Argentina	Exótico	Cerezo de navidad, pimentero brasileño	21
Annonaceae	<i>Annona muricata</i>	Perú, Sudamérica	Nativo	Guanabana	6
Annonaceae	<i>Inga edulis</i>	Perú, América tropical	Nativo	Pacay	8
Annonaceae	<i>Inga feuillei</i>	Perú, América tropical	Nativo	Guamo, Pacay mono	3
Apocynaceae	<i>Nerium oleander</i>	Mediterráneo	Exótico	Laurel rosa	2
Apocynaceae	<i>Plumeria rubra</i>	México, América central	Exótico	Suche	1
Apocynaceae	<i>Thebetia peruviana</i>	México, Perú, América tropical	Nativo	Cascabel, azuceno	4
Araliaceae	<i>Schefflera actinophylla</i>	Australia	Exótico	Árbol paraguas	35
Araucariaceae	<i>Araucaria columnaris</i>	Nueva Caledonia	Exótico	Pino de Cook	8
Arecaceae	<i>Acrocomia aculeata</i>	México y Costa Rica	Exótico	Coyol	7
Arecaceae	<i>Adonidia merrillii</i>	Filipinas	Exótico	Palma de Manila o palma de navidad	13
Arecaceae	<i>Archontophoenix alexandrae</i>	Australia	Exótico	Palma Alejandra	178
Arecaceae	<i>Dypsis lutescens</i>	Madagascar	Exótico	Palma de frutos de oro, palma areca	1
Arecaceae	<i>Phoenix canariensis</i>	Islas Canarias	Exótico	Palma Canaria	5
Arecaceae	<i>Roystonea regia</i>	Cuba	Exótico	Palma Real	51
Arecaceae	<i>Syagrus romanzoffiana</i>	Brasil, Paraguay	Exótico	Palma Pindó	26
Arecaceae	<i>Washingtonia robusta</i>	México	Exótico	Palma de abanico mexicana	14
Arecaceae	<i>Wodyetia bifurcata</i>	Australia	Exótico	Palma rabo de zorro	2
Bignoniaceae	<i>Handroanthus ochraceus</i>	Perú, América central	Nativo	Cortez amarillo	4
Bignoniaceae	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	México, Brazil, Bolivia y Paraguay	Exótico	Jacaranda	27
Bignoniaceae	<i>Kigelia africana</i>	Senegal, Tanzania	Exótico	árbol de las salchichas	3
Bignoniaceae	<i>Markhamia lutea</i>	Este de África	Exótico	Tulipan del Nilo	1
Bignoniaceae	<i>Spathodea campanulata</i>	África tropical	Exótico	Tulipero del Gabón	10
Bignoniaceae	<i>Tabebuia rosea</i>	México	Exótico	Apamate	1
Bignoniaceae	<i>Tecoma stans</i>	Perú, América	Nativo	Huaranhuay	9
Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	México	Exótico	Papaya	1
Casuarinaceae	<i>Casuarina equisetifolia</i>	Australia	Exótico	Casuarina cola de caballo	6
Combretaceae	<i>Terminalia catappa</i>	India, Nueva Guinéa	Exótico	Almendra malabar	2
Cupressaceae	<i>Cupressus macrocarpa</i>	California EEUU	Exótico	Cipres	4

...continuación Anexo 13.

Familia	Nombre científico	Distribución	Origen	Nombre vulgar	Ind.
Euphorbiaceae	<i>Hura crepitans</i>	Peru	Nativo	Catahua	2
Euphorbiaceae	<i>Sapum glandulosum</i>	Brazil, Perú y Paraguay	Nativo	Kurupika	1
Fabaceae	<i>Acacia macracantha</i>	Perú, Argentina, Bolivia	Nativo	Espino, algarrobo	13
Fabaceae	<i>Acacia saligna</i>	Australia	Exótico	Acacia azul	4
Fabaceae	<i>Acrocarpus fraxinifolius</i>	India	Exótico	Cedro rosado	13
Fabaceae	<i>Caesalpinia spinosa</i>	Perú, Ecuador, Colombia y Chile	Nativo	Tara	1
Fabaceae	<i>Calliandra angustifolia</i>	Perú	Nativo	Bobinzana	1
Fabaceae	<i>Cassia fistula</i>	India	Exótico	Lluvia dorada	2
Fabaceae	<i>Cassia javanica</i>	Sudeste asiático	Exótico	Casia de Java	14
Fabaceae	<i>Ceratonia siliqua</i>	Mediterráneo	Exótico	Algarrobo	10
Fabaceae	<i>Delonix regia</i>	Madagascar	Exótico	Fromboyan	68
Fabaceae	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	México, Costa Rica, Brazil	Exótico	Guanacaste	6
Fabaceae	<i>Erythrina crista-galli</i>	Argentina, Uruguay	Exótico	Pico de gallo	5
Fabaceae	<i>Erythrina smithiana krukoff</i>	Ecuador	Exótico	Porotillo	8
Fabaceae	<i>Erythrina velutina</i>	Perú, Ecuador y Colombia	Nativo	Pepito colorado	3
Fabaceae	<i>Gleditsia triacanthos</i>	USA	Exótico	Acacia de tres espinas	1
Fabaceae	<i>Parkinsonia aculeata</i>	USA y México	Exótico	Espinillo	2
Fabaceae	<i>Tamarindus indica</i>	África	Exótico	Tamarindo	2
Fabaceae	<i>Tipuana tipu</i>	Brazil, Argentina, Paraguay y Bolivia	Exótico	Tipa	52
Fabaceae	<i>Vachellia aroma</i>	Perú, Argentina, Paraguay y Chile	Nativo	Aromo negro	7
Juglandaceae	<i>Juglans regia</i>	Oriente medio	Exótico	Nogal	5
Lauraceae	<i>Persea americana</i>	México, Guatemala, Perú, Ecuador	Nativo	Palta, aguacate	4
Lythraceae	<i>Lafoensia punicifolia</i>	Perú, México	Nativo	Almendro amarillo.	1
Malvaceae	<i>Bunchosia armeniaca</i>	Perú, Venezuela, Colombia	Nativo	Ciruelo de fraile	1
Malvaceae	<i>Brachychiton acerifolius</i>	Australia	Exótico	Árbol de fuego	52
Malvaceae	<i>Ceiba trichistandra</i>	Perú	Nativo	Ceiba	7
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i>	Perú, Argentina, Bolivia	Nativo	Palo borracho, árbol botella	72
Malvaceae	<i>Guazima crinita</i>	Perú, Brasil, Bolivia	Nativo	Bolama blanca	27
Malvaceae	<i>Guazima ulmifolia</i>	México, Ecuador, Perú	Nativo	Bolama negra	1
Malvaceae	<i>Hibiscus tiliaceus</i>	Australia, Oceanía	Exótico	Majagua común de Cuba	30
Malvaceae	<i>Lagunaria patersonia</i>	Australia	Exótico	Árbol de pirámide	1
Malvaceae	<i>Ochroma pyramidale</i>	México, Brasil, Perú, Bolivia	Nativo	Palo balsa	33

Familia	Nombre científico	Distribución	Origen	Nombre vulgar	Ind.
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	México, Perú	Nativo	Cedro americano	30
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i>	Sudeste asiático	Exótico	Cinamomo	1
Meliaceae	<i>Swietenia humilis</i>	México, Guatemala, Belice y Honduras	Exótico	Caoba	4
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i>	Sur este de Asia y norte de Australia	Exótico	Caucho benjamina	11
Moraceae	<i>Ficus carica</i>	Mediterráneo	Exótico	Higo	9
Moraceae	<i>Ficus deltoidea</i>	Malasia	Exótico	Higo muerdago	2
Moraceae	<i>Ficus elastica</i>	Asia tropical, India y Malasia	Exótico	Hule, caucho	7
Moraceae	<i>Ficus lyrata</i>	África tropical	Exótico	Ficus lira	2
Moraceae	<i>Ficus religiosa</i>	Nepal, India y China	Exótico	Higuera de las pagodas	1
Moraceae	<i>Ficus retusa</i>	Asia, Australia, China, Malasia	Exótico	Laurel de Malasia	2
Moraceae	<i>Ficus rubiginosa</i>	Australia	Exótico	Higuera del puerto Jackson	2
Myrtaceae	<i>Callistemon citrinus</i>	Australia	Exótico	Escobillon rojo	5
Myrtaceae	<i>Corymbia citriodora</i>	Australia	Exótico	Eucaipto olor a limón	2
Myrtaceae	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Australia	Exótico	Ecaipto rojo	15
Myrtaceae	<i>Eucalyptus globulus</i>	Australia, Tasmania	Exótico	Ecaipto blanco	8
Myrtaceae	<i>Eucalyptus longifolia</i>	Australia	Exótico	Menta piperita de río	42
Myrtaceae	<i>Melaleuca acacioides</i>	Australia, Papua Nueva Guinea	Exótico	Corteza de papel coster	3
Myrtaceae	<i>Pimenta dioica</i>	México, Guatemala, Cuba y Jamaica	Exótico	Pimienta de Jamaica	7
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	Colombia, Ecuador y Perú	Nativo	Guayaba	6
Oleaceae	<i>Fraxinus americana</i>	Norteamérica	Exótico	Fresno	15
Oleaceae	<i>Olea europaea</i>	Cuenca del Mediterráneo	Exótico	Olivo	2
Oxalidaceae	<i>Averrhoa carambola</i>	Indonesia, Malasia	Exótico	Carambola	1
Phytolaccaceae	<i>Phytolacca dioica</i>	Argentina y Uruguay	Exótico	Ombú, Bella sombra	1
Pinaceae	<i>Pinus patula</i>	México	Exótico	Pino amarillo	19
Piperaceae	<i>Piper sp</i>	Perú, Colombia	Nativo	Matico	3
Podocarpaceae	<i>Podocarpus glomeratus</i>	Perú, Bolivia	Nativo	Romerillo, Intimpa	3
Polygonaceae	<i>Coccoloba uvifera</i>	México	Exótico	Kino americano	1
Polygonaceae	<i>Ruprechtia apetala</i>	Argentina y Bolivia	Exótico	Ivaró	2
Proteaceae	<i>Grevillea robusta</i>	Australia	Exótico	Roble sedoso	19
Proteaceae	<i>Macadamia ternifolia</i>	Australia, Nueva Caledonia, Indonesia	Exótico	Nuez de arbusto	1
Rosaceae	<i>Eriobotrya japonica</i>	China	Exótico	Nispero japonés	2
Rosaceae	<i>Prunus avium</i>	Europa, Occidente asiático	Exótico	Cerezo de monte	4

...continuación Anexo 13.

Familia	Nombre científico	Distribución	Origen	Nombre vulgar	Ind.
Rosaceae	<i>Prunus persica</i>	Afganistán, China e Irán	Exótico	Melocotonero, durazno	1
Rosaceae	<i>Prunus serrulata</i>	Japón, Korea y China	Exótico	Cerezo de flor japones	18
Rubiaceae	<i>Calycophyllum spruceanum</i>	Colombia, Ecuador y Perú	Nativo	Capirona	2
Rutaceae	<i>Casimiroa edulis</i>	América central	Exótico	Zapote blanco	2
Rutaceae	<i>Citrus reticulata</i>	India y China	Exótico	Mandarino	3
Salicaceae	<i>Pópulus nigra</i>	Europa, Asia	Exótico	Álamo negro	4
Salicaceae	<i>Salix humboldtiana</i>	México	Exótico	Sauce	5
Sapindaceae	<i>Harpullia pendula</i>	Australia	Exótico	Árbol de los tulipanes	13
Sapindaceae	<i>Koelreuteria paniculata</i>	Japón, Korea y China	Exótico	Árbol de los farolitos	14
Sapindaceae	<i>Matayba sp.</i>	Colombia, Ecuador y Perú	Nativo		5
Sapindaceae	<i>Sapindus saponaria</i>	México	Exótico	Jabonsillo	12
Solanaceae	<i>Brugmancia arborea</i>	Perú y América del Sur	Nativo	Floripondio	5
TOTAL					1268

Anexo 14.- Histórico de la concentración de PM₁₀. Fuente (SENAMHI)

PM 10 - Estación Campo de marte (Prom. Mensual)									
MES	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero	46.8	41.3	35.8	30.9	35.1	31.7		28.6	18.9
Febrero			40.1	45.1	41.6	38.2	33.8	25.6	16.6
Marzo	58.1	51.7	49.4	47.5	52.4	35.6	29.3	30.7	17.8
Abril	48.6	51.8	56.8	51.7	45	38.9	31.9	36.4	21.6
Mayo	48.3	59.6	59.3	40.3	50.2	44.7	39.8	37.6	31
Junio	41.2	49.6	57.3	57.4	84.2	44.7		34.7	28.9
Julio	38.6	61.1	90.1	51.1	47.3	32		28.3	24.2
Agosto	42.7	93.4	57.8	44.8	37.4	29.9		29.4	26.5
Septiembre	43.8	38.2	52.5	48.8		32.6		28	30.8
Octubre	41.8	38.6	40.1	39.9	31.4	32.6		21.7	34.8
Noviembre	41.9	33.8	36.2	40.1	33.8	39		22.2	27.9
Diciembre	42.3	36.8	31.3	38.3	36.5	35.4		20.4	26.4

Anexo 15.- Histórico de la concentración de PM_{2.5}. Fuente (SENAMHI)

PM 2.5 - Estación Campo de marte (Prom. Mensual)						
MES	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Enero		20.3	13.7		15	13.1
Febrero		12.5		11.5	13.7	10.3
Marzo		12.8	13	10.7	18	12.1
Abril		19.7	15.9	11.3	20.7	16
Mayo		17.5	22.9	11.8	26.9	23.8
Junio		20.8			26.6	24.38
Julio		16.3	15		21.7	20.9
Agosto		16.1	13.4		22.1	24
Septiembre			13.7		21.6	23.4
Octubre	18.2	14.3	11.7		16.3	24.3
Noviembre	14.5	13	10.3		16.2	19.2
Diciembre		14.3	7.3		14.8	17.8

Anexo 16.- Partículas suspendidas totales en las placas receptoras.

Placa	Peso inicial	Peso final	Menos intemperie	PST g.	PST t.	área km2	t/km2
1	8.7595	9.0555	8.802	0.0425	4.25E-08	6.36E-09	6.6806
2	8.6576	8.9649	8.7114	0.0538	5.38E-08	6.36E-09	8.4568
3	8.9723	9.255	9.0015	0.0292	2.92E-08	6.36E-09	4.5899
4	6.5681	6.8247	6.5712	0.0031	3.10E-09	6.36E-09	0.4873
5	8.6642	8.9448	8.6913	0.0271	2.71E-08	6.36E-09	4.2599
6	8.9450	9.2481	8.9946	0.0496	4.96E-08	6.36E-09	7.7966
7	8.7984	9.0551	8.8016	0.0032	3.20E-09	6.36E-09	0.5030
8	8.9286	9.2113	8.9578	0.0292	2.92E-08	6.36E-09	4.5899
9	8.9757	9.2491	8.9956	0.0199	1.99E-08	6.36E-09	3.1281
10	9.0973	9.3782	9.1247	0.0274	2.74E-08	6.36E-09	4.3070
11	8.8918	9.1824	8.9289	0.0371	3.71E-08	6.36E-09	5.8318
12	8.9737	9.2352	8.9817	0.0080	8.00E-09	6.36E-09	1.2575
13	8.9784	9.251	8.9975	0.0191	1.91E-08	6.36E-09	3.0023
14	9.0489	9.3388	9.0853	0.0364	3.64E-08	6.36E-09	5.7217
15	8.9668	9.2409	8.9874	0.0206	2.06E-08	6.36E-09	3.2381
16	8.9905	9.3837	9.1302	0.1397	1.40E-07	6.36E-09	21.9595
17	8.8002	9.0683	8.8148	0.0146	1.46E-08	6.36E-09	2.2950
18	8.6874	9.0776	8.8241	0.1367	1.37E-07	6.36E-09	21.4879
19	8.7435	9.0167	8.7632	0.0197	1.97E-08	6.36E-09	3.0966
20	8.9752	9.2347	8.9812	0.0060	6.00E-09	6.36E-09	0.9431
21	6.7790	7.0367	6.7832	0.0042	4.20E-09	6.36E-09	0.6602
22	8.7858	9.1531	8.8996	0.1138	1.14E-07	6.36E-09	17.8882
23	8.8314	9.0984	8.8449	0.0135	1.35E-08	6.36E-09	2.1221
24	8.6678	9.0962	8.8427	0.1749	1.75E-07	6.36E-09	27.4925
25	8.7927	9.0567	8.8032	0.0105	1.05E-08	6.36E-09	1.6505
26	8.8661	9.1487	8.8952	0.0291	2.91E-08	6.36E-09	4.5742
27	8.7825	9.0547	8.8012	0.0187	1.87E-08	6.36E-09	2.9395
28	8.8027	9.1182	8.8647	0.0620	6.20E-08	6.36E-09	9.7458
29	8.7146	9.0051	8.7516	0.0370	3.70E-08	6.36E-09	5.8160
30	6.5714	6.8488	6.5953	0.0239	2.39E-08	6.36E-09	3.7568

Anexo 17.-Valores de caracteres funcionales de los 30 individuos muestreados y la cantidad de material particulado retenido.

Código	# Hojas	Altura colecta (m)	Grosor (mm)	Área (cm²)	Pecíolo (cm)	Masa (g)	SLA (g/cm²)	PM10 (g)	PM2.5 (g)
119_Brachychiton acerifolius	11	3.150	0.174	2087.900	12.427	8.745	177.850	1.1827	0.0125
3_Brachychiton acerifolius	7	4.150	0.227	2399.840	16.386	12.712	95.632	0.2730	0.0084
373_Brachychiton acerifolius	7	3.460	0.226	1843.100	9.943	10.267	89.849	0.2107	0.0014
316_Ceiba speciosa	8	2.560	0.215	2013.040	11.675	8.015	127.701	0.3062	0.0127
353_Ceiba speciosa	8	2.960	0.199	1232.800	8.313	4.298	156.506	0.0055	0.0019
196_Ceiba speciosa	8	3.100	0.187	1390.840	8.225	4.931	142.778	0.0387	0.0017
1133_Delonix regia	5	4.700	0.218	2964.500	7.120	18.149	81.644	0.2438	0.0673
823_Delonix regia	5	3.500	0.219	4396.600	9.940	25.238	86.184	0.2777	0.0336
382_Delonix regia	6	2.480	0.279	1766.000	4.371	11.595	81.032	0.0043	0.0065
1096_Ficus benjamina	25	3.400	0.296	450.800	0.872	1.928	119.895	0.1074	0.0118
640_Ficus benjamina	25	3.600	0.217	769.200	1.160	3.971	99.475	0.1008	0.0042
1165_Ficus benjamina	25	4.500	0.229	816.280	1.248	4.247	96.570	0.3576	0.0043
97_Hibiscus tiliaceus	9	1.850	0.284	4455.100	11.844	23.946	96.307	0.1908	0.0203
539_Hibiscus tiliaceus	9	2.950	0.240	1951.840	6.722	8.820	110.856	0.1276	0.0027
302_Hibiscus tiliaceus	9	3.350	0.307	2772.680	7.567	15.102	94.931	0.0355	0.0030
1170_Koelreuteria paniculata	6	2.430	0.134	7943.640	9.083	31.562	130.839	1.1512	0.0620
18_Koelreuteria paniculata	6	3.930	0.158	9350.180	9.667	42.821	110.170	1.2340	0.0710
724_Koelreuteria paniculata	5	3.300	0.141	12558.460	8.483	43.222	144.697	0.8985	0.0315
1176_Schinus molle	12	3.240	0.337	742.040	3.958	6.231	59.933	0.1008	0.0247
805_Schinus molle	12	3.100	0.261	815.380	4.867	5.138	85.124	0.0992	0.0159
996_Schinus molle	12	3.640	0.337	1262.780	4.358	9.406	71.794	0.2320	0.0176
770_Schinus terebinthifolius	36	3.100	0.263	1803.300	1.453	7.538	140.059	0.2050	0.0130
870_Schinus terebinthifolius	12	2.940	0.283	1217.420	1.292	7.469	82.362	0.1601	0.0059
51_Schinus terebinthifolius	12	3.570	0.249	1609.040	2.525	7.973	102.031	0.0910	0.0039
516_Tecoma stans	8	3.250	0.185	3545.040	6.575	11.847	255.064	0.2740	0.0341
355_Tecoma stans	7	3.800	0.167	1570.580	6.200	4.346	185.109	0.1061	0.0125
754_Tecoma stans	8	3.200	0.183	2299.660	5.800	8.982	128.953	0.1287	0.0067
643_Tipuana tipu	7	2.440	0.242	1696.320	2.886	10.270	85.545	0.5471	0.0345
404_Tipuana tipu	8	3.500	0.220	1886.000	1.675	9.066	104.440	0.5554	0.0167
111_Tipuana tipu	8	3.400	0.293	2579.220	1.813	16.223	181.591	0.3773	0.0059

Anexo18.- Correlación de Pearson entre la cantidad de MP retenido por m² de área foliar y la distancia del árbol con respecto a las calles y avenidas que los rodean.

