



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES



***CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO EN
HOJAS DE ÁRBOLES DEL MUNICIPIO DE
TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO***

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA

ARTURO MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

DIRIGIDO POR:

DR. EN C. DEL A. JORGE PAREDES TAVARES

FACULTAD DE PLANEACIÓN URBANA Y REGIONAL

DRA. EN C.Q.B. ARACELI AMAYA CHÁVEZ

FACULTAD DE QUÍMICA

MARZO, 2017

ACRÓNIMOS

μm	micra, micrómetro; milésima parte de un milímetro
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CCN	Núcleo de Condensación de Agua (<i>Cloud Condensation Nuclei</i>)
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua (México)
DOF	Diario Oficial de la Federación (México)
EPA	Agencia de Protección Ambiental de EUA (<i>US Environmental Protection Agency</i>)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GEM	Gobierno del Estado de México
IGCEM	Instituto de Información e Investigación Geográfica, Estadística y Catastral del Estado de México
IMECA	Índice Metropolitano de Calidad del Aire
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
MP	Material Particulado (atmosférico)
NOM-025	Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de PST, PM ₁₀ y PM _{2.5}
NTEA-015	Norma Técnica Ambiental Estatal NTEA-015-SMA-DS-2012, que establece las condiciones de protección, conservación, fomento y creación de las áreas arboladas y verdes de las zonas urbanas en el territorio del Estado de México
PACMUN	Plan de Acción Climática Municipal (Toluca)
PDM	Plan de Desarrollo Municipal Toluca (2016-2018)
PM10	Fracción gruesa torácica de material particulado. Diámetro aerodinámico menor a 10 μm
PM2.5	Fracción fina torácica de material particulado. Diámetro aerodinámico menor a 2.5 μm
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
pp.	Precipitación
ProAire	Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca
PST	Partículas Suspendidas Totales. Diámetro aerodinámico $\leq 25\text{-}45 \mu\text{m}$
RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca
REMA	Red Mexicana de Aerobiología
SEyMEP	Subdirección de Embellecimiento y Mantenimiento del Espacio Público. H. Ayuntamiento de Toluca
UFP	Partículas Ultrafinas (<i>Ultrafine particles</i>). Diámetro aerodinámico menor a 0.1 μm
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator
WHO	Organización Mundial de la Salud (<i>World Health Organization</i>)
ZMVT	Zona Metropolitana del Valle de Toluca

SÍMBOLOS Y FÓRMULAS QUÍMICAS

$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Sulfato de amonio
Al	Aluminio
Br	Bromo
C	Carbono
Cd	Cadmio
CO_2	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Mn	Manganeso
N	Nitrógeno
Nb	Niobio
NH_4	Amonio
Ni	Níquel
NO_3	Nitrato
O_3	Ozono
Pb	Plomo
S	Azufre
SO_4	Sulfato
Ti	Titanio
V	Vanadio
Zn	Zinc

CONTENIDO

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	2
JUSTIFICACIÓN	4
HIPÓTESIS	4
OBJETIVOS	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 1	6
1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO	7
1.1.1. Material Particulado	8
1.1.2. Clasificación del material particulado	9
1.1.3. Dinámica del material particulado en la atmósfera	14
1.1.4. Efectos del material particulado en la salud y el ambiente	22
1.2 ÁREAS VERDES URBANAS	31
1.2.1. Servicios ecosistémicos en Áreas Verdes Urbanas	32
1.2.2. Inconvenientes de las Áreas Verdes Urbanas	37
1.3 CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO POR VEGETACIÓN URBANA	39
1.3.1. Mecanismos de captura de material particulado en plantas	39
1.4 ÁREAS VERDES Y MATERIAL PARTICULADO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA	51
1.4.1. Características biofísicas	52
1.4.2. Características socioeconómicas	58
1.4.3. Contaminación por Material Particulado en el municipio de Toluca, México	62
1.4.4. Estado actual de las áreas verdes en el municipio de Toluca	68
1.5 ANTECEDENTES	71
CAPÍTULO 2	78
2.1 Selección de sitios de muestreo	80
2.2 Selección de especies para el muestreo	80
2.3 Muestreo	81
2.4 Cuantificación de material particulado depositado	82
2.5 Análisis de variables meteorológicas	84
2.6 Caracterización de las especies analizadas a considerar en la forestación	85
CAPÍTULO 3	86
3.1 Selección de sitios de muestreo	87
3.2 Especies seleccionadas	89
3.3 Realización del muestreo	91
3.4 Depósito seco encontrado por especie	92
3.4.1. Familia Cupressaceae	92
3.4.2. <i>Fraxinus uhdei</i>	94
3.4.3. <i>Ligustrum lucidum</i>	96
3.4.4. <i>Liquidambar styraciflua</i>	97
3.4.5. Análisis general de especies	99

3.5	Depósito seco encontrado por sitio de muestreo.....	100
3.6	Influencia de variables meteorológicas	102
3.6.1.	Días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo.....	104
3.6.2.	Velocidad y dirección del viento	106
CAPÍTULO 4	112
4.1	Características de habitabilidad de las especies analizadas	113
4.1.1.	Origen.....	115
4.1.2.	Condición reproductiva	115
4.1.3.	Follaje.....	116
4.1.4.	Características de la copa.....	116
4.1.5.	Características de la hoja.....	117
4.1.6.	Alergenicidad por polen.....	117
4.1.7.	Altura	119
4.1.8.	Tipo de raíz.....	120
4.1.9.	Tolerancia ambiental y necesidades de riego	120
4.1.10.	Crecimiento	121
4.1.11.	Emisiones biogénicas.....	121
4.2	Recomendaciones para las especies analizadas a considerar en una propuesta de forestación.....	122
4.2.1.	Recomendaciones para Cupressaceae (exclusivo para <i>Cupressus sempervirens</i> , <i>Thuja sp.</i> y <i>Juniperus sp.</i>).....	122
4.2.2.	Recomendaciones para <i>Fraxinus uhdei</i> (fresno).....	123
4.2.3.	Recomendaciones para <i>Ligustrum lucidum</i> (trueno).....	123
4.2.4.	Recomendaciones para <i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar)	123
CAPÍTULO 5	126
5.1	Conclusiones.....	127
5.2	Recomendaciones.....	128
REFERENCIAS	129
ANEXO 1	142

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1. Clasificación de las partículas según su tamaño.....	9
Cuadro 1.2. Servicios ecosistémicos	33
Cuadro 1.3. Efectos en la vegetación causados de acuerdo al tipo de deposición.....	41
Cuadro 1.4. Tipos de suelo presentes en el municipio de Toluca.....	56
Cuadro 1.5. Media diaria y media anual de PM ₁₀ registradas en las estaciones de la RAMA-ZMVT 2011-2016.	63
Cuadro 1.6. Media diaria y media anual de PM _{2.5} registradas en las estaciones de la RAMA-ZMVT 2011-2016.	65
Cuadro 1.7. Áreas Verdes Urbanas del municipio de Toluca (2015)	69
Cuadro 3.1. Ejemplares muestreados en el municipio de Toluca, Estado de México.	91
Cuadro 3.2. Depósito seco (g kg ⁻¹) en hojas de la familia Cupressaceae en el municipio de Toluca, Estado de México.	92
Cuadro 3.3. Depósito seco (g kg ⁻¹) en hojas de <i>Fraxinus uhdei</i> (fresno) en el municipio de Toluca, Estado de México.	94
Cuadro 3.4. Depósito seco (g kg ⁻¹) en hojas de <i>Ligustrum lucidum</i> (trueno) en el municipio de Toluca, Estado de México.....	96
Cuadro 3.5. Depósito seco (g kg ⁻¹) en hojas de <i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar) en el municipio de Toluca, Estdo de México.	97
Cuadro 3.6. Material particulado depositado (g kg ⁻¹) en hojas de Cupressaceae (fam.), <i>F. uhdei</i> , <i>L. lucidum</i> , y <i>L. styraciflua</i> en el municipio de Toluca, Estado de México.	99
Cuadro 3.7. Depósito seco (g kg ⁻¹) en hojas de Cupressaceae (fam.), <i>F. udhei</i> , <i>L. lucidum</i> y <i>L. styraciflua</i> en el municipio de Toluca, Estado de México.....	100
Cuadro 3.8. Días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo por cada sitio en el municipio de Toluca.....	104
Cuadro 3.9. Dirección y velocidad del viento promedio en los diez días anteriores a la fecha de muestreo en el municipio de Toluca, Estado de México.	106
Cuadro 4.1. Características y necesidades de habitabilidad de Cupressaceae (fam.), <i>F. uhdei</i> , <i>L. lucidum</i> y <i>L. styraciflua</i>	114
Cuadro 4.2. Especies sugeridas para la ciudad de Toluca.....	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Clasificación de las partículas según su diámetro aerodinámico.....	11
Figura 1.2. Diversidad del material particulado	13
Figura 1.3. Mecanismos de deposición seca.....	17
Figura 1.4. Procesos que intervienen en la deposición húmeda.....	20
Figura 1.5. Procesos de emisión, transporte y deposición atmosférica	21
Figura 1.6. Sitios de depositación de las partículas en el aparato respiratorio de acuerdo con el tamaño de la partícula.....	24
Figura 1.7. Mecanismos de eliminación de partículas en el organismo humano.	26
Figura 1.8. Modificación de los estomas por la presencia de partículas en <i>Cassia fistula</i>	27
Figura 1.9. Daño poco significativo en estomas de <i>Bougainvillea</i> 'Mahara'.	29
Figura 1.10. Mecanismos de deposición de partículas en la vegetación.	40
Figura 1.11. Estomas y tricomas presentes en la superficie externa de una hoja.	44
Figura 1.12. Partículas capturadas en la superficie rugosa adaxial de <i>Quercus variabilis</i>	46
Figura 1.13. Tricomas protegiendo los estomas de material particulado en la superficie abaxial de <i>Olea europaea</i>	47
Figura 1.14. Degradación de la cutícula en hojas de <i>Pinus silvestris</i> por efecto de deliquescencia de partículas de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	50
Figura 1.15. Localización del municipio de Toluca, Estado de México.....	51
Figura 1.16. Climograma de la estación climatológica Toluca 1951-2010.	52
Figura 1.17. Promedio de días con niebla en la Estación Climatológica Toluca 1951-2010	53
Figura 1.18. Vientos predominantes de la ZMVT.	55
Figura 1.19. Mapa edafológico del municipio de Toluca.....	57
Figura 1.20. Población total en el municipio de Toluca 1960-2010..	59
Figura 1.21. Unidades Económicas en el municipio de Toluca (1999-2014).....	59
Figura 1.22. Población Ocupada por Sector de Act. Económica en el municipio de Toluca (2010)...	60
Figura 1.23. Vehículos de motor registrados en circulación en el mun. de Toluca (1980-2014).....	61
Figura 1.24. Mosaico de la calidad del aire por PM_{10} en la ZMVT (2011-2016)	62
Figura 1.25. Mosaico de la calidad del aire por $\text{PM}_{2.5}$ en la ZMVT (2011-2016).....	64
Figura 2.1. Ruta metodológica de la investigación.	79
Figura 2.2. Colecta de muestras para la cuantificación de material particulado depositado.	81
Figura 2.3. Pesado y sonicado de hojas para la cuantificación de mat. particulado depositado.	82
Figura 2.4. Trasvase y centrifugado de muestras para la cuantificación de mat. particulado depositado.....	83
Figura 2.5. Secado y pesado de muestras para la cuantificación de mat. particulado depositado... ..	84
Figura 3.1. Sitios de muestreo.....	87
Figura 3.2. Localización de los sitios de muestreo y su cercanía a centros de exposición de la población a material particulado.	88
Figura 3.3. Especie seleccionada: <i>Fraxinus uhdei</i> (fresno).	89
Figura 3.4. Especie seleccionada: <i>Ligustrum lucidum</i> (trueno).....	90
Figura 3.5. Especie seleccionada: <i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar).....	90
Figura 3.6. Especies seleccionadas: Familia Cupressaceae (cipreses, enebros).....	91
Figura 3.7. Partículas depositadas en la superficie de las hojas de Cupressaceae (fam.)	93
Figura 3.8. Partículas depositadas en la superficie de una hoja de <i>Fraxinus uhdei</i> (fresno).	95
Figura 3.9. Partículas depositadas en la superficie de una hoja de <i>Ligustrum lucidum</i> (trueno).....	97

Figura 3.10. Partículas depositadas en la superficie de una hoja de <i>Liquidambar styraciflua</i> (<i>liquidámbar</i>).....	98
Figura 3.11. Estaciones utilizadas para el análisis de variables meteorológicas en el depósito de mat. particulado en hojas de árboles en el municipio de Toluca, Estado de México..	103
Figura 3.12. Velocidad promedio y frecuencia de dirección del viento registradas en las estaciones de referencia 10 días previos a la fecha de muestreo en cada sitio.	109
Figura 3.13. Velocidad y dirección del viento registrados en las estaciones de referencia 10 días previos a la fecha de muestreo por sitio, y vientos históricos predominantes en la ZMVT.	111

RESUMEN

La contaminación atmosférica presente en el municipio de Toluca, Estado de México, origina problemas de salud, cambios en el microclima, deterioro de la imagen urbana y una disminución de la calidad de vida de los habitantes. En este sentido, se ha comprobado la capacidad de las áreas verdes urbanas para capturar contaminantes atmosféricos, entre ellos el material particulado, asociado principalmente con trastornos del aparato cardiovascular y respiratorio.

En este trabajo se realizó una cuantificación de material particulado depositado en las hojas de cuatro árboles seleccionados por su abundante distribución en el municipio: *Fraxinus uhdei* (fresno), *Ligustrum lucidum* (trueno), *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar) y de la familia Cupressaceae (ciprés, enebro y tulia). Para ello, se obtuvieron las partículas depositadas en las hojas y posteriormente se realizó un análisis de habitabilidad urbana para las especies mencionadas.

Dentro de los ejemplares muestreados se obtuvo un depósito seco superior a los 10 g kg⁻¹ de depósito fresco con mayor frecuencia en los árboles de la familia Cupressaceae (69.2%) y un depósito seco inferior a los 5 g kg⁻¹ con mayor frecuencia (77.78%) en el liquidámbar. Para el caso de fresno y trueno, en la mayoría de los ejemplares (83.33% y 95.45%, respectivamente) se encontraron valores inferiores a los 10 g kg⁻¹.

Los sitios en los que se encontraron ejemplares con concentraciones de depósito superiores a los 10 g kg⁻¹ fueron Maquinita, IMSS, Tablajeros y Odontología; y en los sitios Vicente Guerrero y Alameda se halló un depósito menor a 5 g kg⁻¹. No se encontró una relación directa de la precipitación (≤ 4.5 mm), dirección y velocidad del viento con el contenido del depósito seco de material particulado.

En cuanto a las recomendaciones de habitabilidad urbana para cada especie, se determinó que Cupressaceae (fam.) puede ser adecuada en camellones, vialidades y paraderos de transporte público; el fresno para centros comerciales o de servicios, terminales de autobuses y estacionamientos; ninguna de estas especies es recomendable para centros escolares o de asistencia médica, por su polen alergénico. El liquidámbar puede ser utilizado en áreas de mediana a amplia extensión como en hospitales; la plantación de trueno debe limitarse y ser reemplazada por otras especies nativas.

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire en las ciudades se ha posicionado como tema importante durante los últimos años debido a las emisiones generadas por las actividades humanas, que sumadas a las características naturales existentes en un territorio modifican constantemente las condiciones de la atmósfera. Estas consecuencias se manifiestan en el aumento de la temperatura global, la presencia de anomalías climáticas, la generación de problemas de salud, el deterioro de la imagen urbana y la disminución del desempeño laboral, entre otros efectos.

Procesos como el crecimiento poblacional, la presencia de corredores industriales y establecimientos comerciales, el incremento de la flota vehicular, la generación de residuos y la satisfacción de otras necesidades en un territorio urbano son parte de las causas asociadas a estos cambios, que suelen influir de manera negativa en el desarrollo de actividades productivas y la calidad de vida de las personas que habitan en una ciudad.

Al respecto, el municipio de Toluca, capital del Estado de México, constituye un núcleo importante para el desarrollo de actividades económicas dentro de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca y fuera de ella con la Zona Metropolitana del Valle de México, lo que conlleva a su vez problemas ambientales y complica las actividades de gestión necesarias para solucionarlos.

Uno de estos grandes problemas es la presencia de material particulado en la atmósfera, contaminante constituido por una mezcla de partículas de diversos tamaños, formas, composición química y propiedades termodinámicas que lo hacen complejo de caracterizar y controlar, por lo que también sus efectos son difíciles de predecir con exactitud (WHO, 2013).

No obstante, un hecho reconocido ampliamente por la comunidad científica es el potencial de las partículas atmosféricas para generar impactos en la salud humana, al ingresar en el organismo a través de diferentes vías de acceso, principalmente la vía aérea. En el interior, las partículas pueden generar procesos inflamatorios o cambios metabólicos, principalmente en los aparatos respiratorio y cardiovascular.

En este sentido, se ha comprobado la efectividad de las áreas verdes urbanas en el suministro de servicios ecosistémicos que contribuyen a satisfacer necesidades de los habitantes de una ciudad, entre ellos, la reducción de contaminantes atmosféricos a través de mecanismos de captura de gases y partículas que interactúan con la vegetación (Janhäll, 2015).

En relación a lo anterior, el municipio de Toluca presenta una baja extensión de áreas verdes por habitante (4.59 m²/hab., según el H. Ayuntamiento de Toluca, 2016a), por lo que el beneficio de la atenuación de contaminantes por parte de la vegetación se ve disminuido.

Esta situación representa una oportunidad para incrementar la superficie de áreas verdes y mejorar el estado de las actuales, tomando en cuenta criterios de mitigación que posicionen a la vegetación urbana como una estrategia de costo relativamente bajo y con una mejor aceptación social para disminuir este problema, en comparación con otros mecanismos restrictivos y estrategias tecnológicas de precios elevados.

JUSTIFICACIÓN

En el municipio de Toluca se presentan múltiples factores causantes de la contaminación atmosférica por material particulado que afectan al medio físico y social. Ante esta situación, las autoridades han implementado diversas acciones basadas en el monitoreo y control de emisiones, principalmente mecanismos restrictivos que permitan cumplir con la normatividad vigente en materia de contaminantes atmosféricos.

Sin embargo, los niveles elevados de gases y partículas siguen siendo un problema constante para el municipio, en el que las áreas verdes pueden contribuir de manera significativa al disminuir la exposición de la población a estos contaminantes, al tiempo que otorgan otros servicios ecosistémicos.

Por esta razón, el conocimiento de las relaciones entre arbolado urbano y la captura de contaminantes atmosféricos puede contribuir en la generación de información útil para los tomadores de decisiones sobre las especies más adecuadas funcionalmente para la reforestación o forestación urbana en el municipio de Toluca, y ser consideradas en la política ambiental de este territorio.

Del mismo modo, el presente trabajo complementa el conocimiento derivado de otras investigaciones relacionadas con el material particulado y la vegetación urbana desarrollados en el municipio de Toluca y su zona metropolitana, al tiempo que puede otorgar un referente para el biomonitoreo en otras ciudades que cuenten con las especies y/o condiciones similares a la estudiada.

HIPÓTESIS

Las especies de árboles más eficientes para la captura de partículas son las que poseen una superficie de contacto tortuosa y constituida por hojas escamiformes.

OBJETIVOS

Objetivo general

Identificar las especies más adecuadas para la captura de material particulado en las hojas de algunos árboles comunes en el municipio de Toluca, mediante la cuantificación del depósito seco en su superficie.

Objetivos específicos

1. Identificar la distribución espacial de arbolado urbano en el municipio y elegir los sitios de muestreo.
2. Seleccionar cuatro especies de árboles comunes en las áreas verdes del municipio de Toluca y realizar un muestreo de su material foliar.
3. Cuantificar el material particulado depositado en las hojas de los ejemplares seleccionados.
4. Elaborar una caracterización de las especies analizadas a considerar en la forestación.

CAPÍTULO 1

MARCO REFERENCIAL



1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MATERIAL PARTICULADO

La atmósfera es una capa gaseosa que rodea a la Tierra, que la protege de la radiación solar y otros cuerpos exteriores; regula la temperatura y la humedad; permite la realización del ciclo del agua y otros ciclos biogeoquímicos; y constituye un medio de transporte de microorganismos, entre otras funciones (Tarbuck & Lutgens, 2005: 11).

Esta capa ha sufrido modificaciones naturales a escala geológica por efectos principales de la actividad volcánica, cambios en la temperatura global y la entrada de cuerpos exteriores al planeta. No obstante, a partir de la Revolución Industrial, con el descubrimiento e incremento potencial de la combustión para la producción de energía y materiales, las emisiones de gases y partículas derivadas de acciones humanas se han incrementado constantemente en periodos de tiempo más cortos.

Lo anterior ha originado problemas de contaminación del aire o atmosférica, que es entendida como un proceso de alteración en la composición natural de la atmósfera cuando sus componentes son modificados en su concentración, características o persistencia, de modo que pueden ser dañinos para los organismos vivos y la infraestructura (Engineers Joint Council; citado en WHO, 1980). También se asocian otros problemas como la modificación de los ecosistemas y la pérdida de biodiversidad; la disminución del rendimiento agrícola y la seguridad alimentaria; modificaciones climáticas, entre otros efectos (PNUMA, 2012).

Respecto a la salud humana, existe cada vez más evidencia del incremento de la mortalidad y morbilidad por causas asociadas a los contaminantes atmosféricos. Según estimaciones de WHO (2014), 3.7 millones de defunciones prematuras fueron atribuidas a la contaminación del aire exterior en el año 2012, lo que representó un 6.7% del total de las muertes en el mundo para ese año.

Espacialmente, las ciudades y sus zonas metropolitanas suelen presentar mayores problemas de contaminación atmosférica en comparación a los territorios rurales, debido a la demanda constante de bienes y servicios necesarios para el desarrollo de actividades industriales, comerciales, administrativas, gubernamentales, educativas y de movilidad que se concentran en estos territorios y, con ello, generan emisiones.

También la contaminación puede ser transfronteriza entre regiones o países, lo que demuestra que los efectos producidos pueden presentarse en sitios diferentes del que fueron originados (WHO, 2006).

Uno de estos contaminantes atmosféricos son las partículas atmosféricas, también conocidas como Material Particulado (MP), aerosoles atmosféricos o en inglés *Particulate Matter* (PM), que son objeto de estudio de esta investigación y que se describen en el desarrollo de este capítulo.

1.1.1. Material Particulado

El material particulado atmosférico se define como el conjunto de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire (WHO, 2013). Es considerado como un contaminante porque puede alterar la composición natural de la atmósfera, además de tener un origen principalmente antropogénico en territorios urbanos (Bell et al., 2011; citado en Barima et al., 2014).

Está constituido por una mezcla de partículas de diferentes tamaños, formas y composición, además de tener un origen diverso. Entre sus componentes químicos comunes se incluyen sales como sulfatos, nitratos, amonio, iones de sodio, potasio, calcio, magnesio y cloruro, carbono orgánico y elemental, material de la corteza terrestre, partículas unidas al agua, metales (incluyendo Cd, Cu, Ni, Cr, Vn, Mn, Zn), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP), algunos de ellos provenientes de polvo de pavimento y productos de combustión incompleta. También se pueden encontrar componentes biológicos como fragmentos de plantas e insectos, esporas, bacterias y virus (Grantz et al., 2003; Freer-Smith et al., 2004; Arciniégas, 2012; WHO, 2013).

El material particulado es analizado como un contaminante de forma específica debido a que las partículas presentan propiedades fisicoquímicas que varían con el tiempo, la región, la meteorología y fuente de emisión, lo que plantea una complicación adicional en el estudio de los impactos a la salud y otros efectos, en comparación a otros contaminantes gaseosos (EPA, 2008; Janhäll, 2015).

1.1.2. Clasificación del material particulado

Las partículas se pueden agrupar en cuatro clasificaciones básicas: según su tamaño, según la fuente que las origine, según sus procesos de formación, y según su composición.

A. Clasificación por tamaño

El tamaño de las partículas es expresado como diámetro aerodinámico. De acuerdo con las técnicas de medición y el sitio de depositación en el aparato respiratorio, las partículas pueden clasificarse por esta característica en Partículas Suspendidas Totales (PST), partículas de la fracción gruesa torácica (PM₁₀), partículas finas (PM_{2.5}) y partículas ultrafinas (UFP) (Cuadro 1.1).

Cuadro 1.1. Clasificación de las partículas según su tamaño

Fracción del material particulado	Abreviatura	Diámetro aerodinámico
Partículas Suspendidas Totales	PST	≤ 25-45 μm
Partículas torácicas, fracción gruesa	PM ₁₀	≤ 10-2.5 μm
Partículas torácicas, fracción fina	PM _{2.5}	< 2.5 μm
Partículas Ultra Finas	UFP	< 0.1 μm

FUENTE: EPA (2008).

A1. Partículas Suspendidas Totales (PST/TSP)

Incluyen partículas de diversos tamaños, que pueden o no ingresar al aparato respiratorio humano. Existe controversia respecto al diámetro aerodinámico incluido en este rango. La Environmental Protection Agency de los Estados Unidos (EPA) estableció en 1971 que las PST se encontraban en un rango de menor o igual a 25 μm y no mayor a 45 μm basándose en la capacidad y precisión de los instrumentos muestreadores gravimétricos de alto volumen existentes en ese tiempo (EPA, 2008). Autores más recientes como Pérez, et al. (2010) mencionan que el diámetro aerodinámico mayor de estas partículas puede alcanzar los 100 μm.

Este rango fue medido extensivamente en los Estados Unidos y otras ciudades europeas durante la década de los setenta-ochenta; no obstante, actualmente no es considerado como un buen indicador de los efectos contaminantes en el aparato respiratorio debido a que algunas partículas no ingresan en el organismo humano (WHO, 2000).

Sin embargo, la presencia de las PST puede generar otros efectos ambientales, como la modificación de la actividad fotosintética en algunas plantas debido a la disminución de la superficie expuesta a la radiación solar, o la disminución de la visibilidad.

A2. *PM*₁₀

Las partículas torácicas de la fracción gruesa (*coarse particles*) incluyen el rango de diámetro aerodinámico menor o igual a 10 µm hasta antes de los 2.5 µm (EPA, 2008). Proviene en su mayoría de fuentes naturales como el polvo del suelo o de agricultura, aunque en las ciudades puede ser originado a partir del carbón depositado, escombros de construcción y polvo de carreteras (Beckett et al., 1998; Araujo, 2011).

A3. *PM*_{2.5}

La fracción fina (*fine particles*) comprende las partículas torácicas de tamaño igual o inferior a 2.5 µm. La mayoría de estas partículas son antropogénicas, como el hollín, sulfatos y nitratos derivadas de emisiones en centrales eléctricas, refinerías, incendios forestales, tubos de escape y emisiones por desgaste de frenos de fuentes móviles (Araujo, 2011).

A4. *Partículas Ultrafinas (UFP)*

Las Partículas Ultra Finas (*ultrafine particles*) incluyen aquellas con tamaño inferior a 0.1 µm y llegan hasta pocos nanómetros. Son generadas principalmente por emisión de tubos de escape de fuentes móviles sobre todo de aquellos que utilizan diésel como combustible: vehículos motorizados, aviones. A pesar de que contribuyen poco en la masa total del material particulado, dominan en número debido a su tamaño (Araujo, 2011; HEI Review Panel on Ultrafine Particles, 2013).

Se consideran de alta peligrosidad debido a que pueden ingresar a estructuras más profundas del aparato respiratorio como los vasos sanguíneos, además de ser más tóxicas y reactivas que las partículas más grandes debido a que poseen un área superficial mayor por unidad de masa (Tiwarý & Colls, 2010; HEI Review Panel on Ultrafine Particles, 2013). (Figura 1.1).

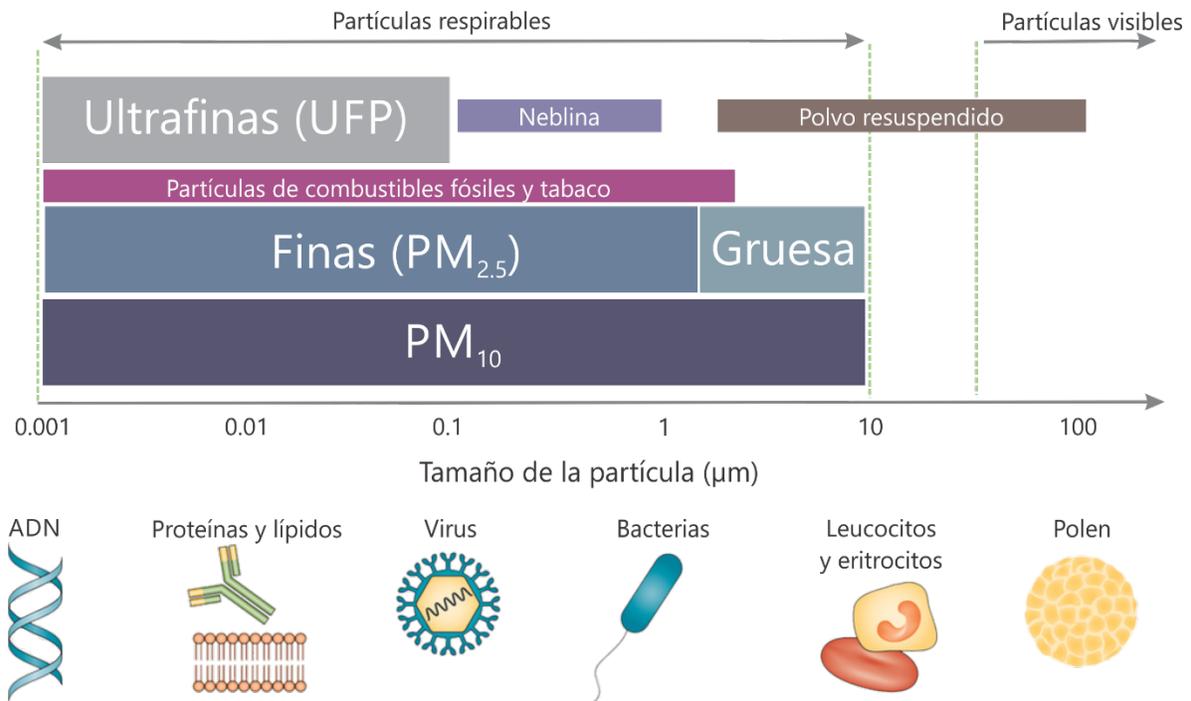


Figura 1.1. Clasificación de las partículas según su diámetro aerodinámico. Cosselman et al. (2015).

B. Clasificación por origen

Las fuentes que originan las partículas están relacionadas con su composición fisicoquímica y diámetro aerodinámico (Fang et al., 2006; citado en Arciniégas, 2012). Esta clasificación las agrupa en naturales o antropogénicas.

Las fuentes naturales comprenden las emisiones terrestres, principalmente por erosión del suelo (litogénicas), erupciones volcánicas, cenizas de incendios y material marino transportado. También se incluyen aquí las partículas provenientes de organismos vivos (Querol, 2006).

Las partículas de origen antropogénico provienen de procesos productivos industriales, de comercio y servicios, de transporte, entre otros, causados por actividades estrictamente humanas (Querol, 2006; Arciniégas, 2012; Rodríguez, et al., 2014). Entre las fuentes principales se encuentran los motores de combustión en vehículos, actividades industriales, producción de energía, erosión de pavimento y desgaste de frenos y llantas (WHO, 2013).

C. Clasificación por formación

Las partículas que son emitidas directamente al aire son llamadas partículas primarias, mientras que las que son generadas por reacciones químicas mediante sustancias precursoras son conocidas como partículas secundarias.

Las partículas primarias y los precursores gaseosos pueden ser de origen natural o antropogénico (WHO, 2013), mientras que las partículas secundarias pueden formarse por la interacción entre un gas y una partícula por adsorción, coagulación o condensación.

Algunos gases precursores de estas reacciones son el dióxido de azufre (resultante de la combustión), óxidos de nitrógeno (originados en procesos industriales y tránsito), amoníaco y Compuestos Orgánicos Volátiles distintos del metano (Freer-Smith et al., 2005; Querol, 2006).

Cabe destacar que las partículas secundarias en su mayoría son encontradas en la fracción fina del material particulado (WHO, 2013).

D. Clasificación por composición química

De acuerdo con Querol (2006), las partículas pueden clasificarse en cinco grupos de acuerdo a sus componentes: materia mineral, aerosol marino, compuestos de azufre, compuestos de nitrógeno y compuestos de carbono (Figura 1.2).

De estos grupos, la materia mineral suele constituir la fracción mayoritaria en cuanto a masa total de aerosol atmosférico y suele presentarse en zonas áridas o semiáridas; seguida de los aerosoles marinos, que se forman por ruptura de burbujas de aire en los océanos y la agitación de mares por el viento. Ambos grupos se clasifican como partículas primarias y naturales.

Respecto los compuestos de azufre, estos suelen ser constituyentes de partículas secundarias, provenientes de emisiones biogénicas o volcánicas, bancos de material (yeso) o procesos de combustión.

Los compuestos de nitrógeno son de origen mayoritariamente secundarios y provienen de la denitrificación de suelos, incendios forestales, descargas eléctricas, emisiones biogénicas y combustión.

Finalmente, los compuestos de carbono pueden provenir de incendios, emisiones volcánicas o derivadas de un proceso de combustión incompleta (Querol, 2006).

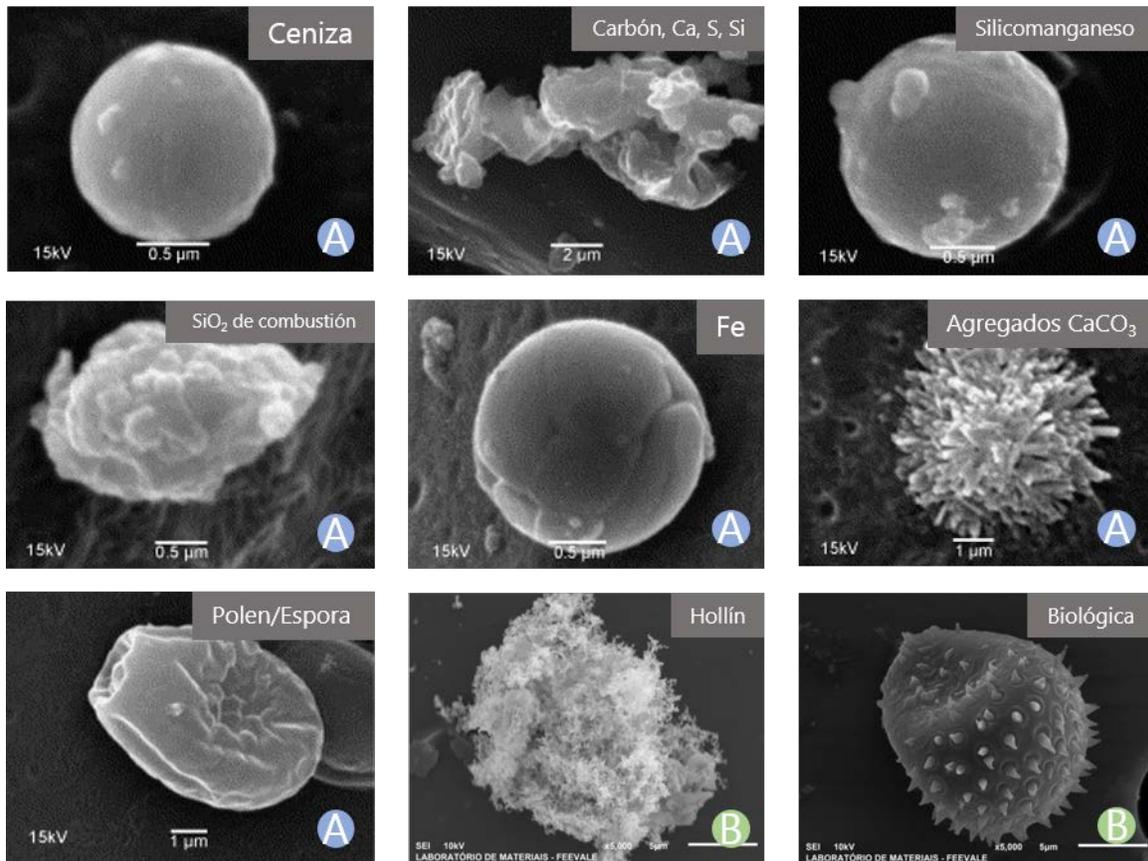


Figura 1.2. Diversidad del material particulado. Modificado de **A** Xie et al. (2005); y **B** Alves et al. (2015).

1.1.3. Dinámica del material particulado en la atmósfera

Las partículas después de ser generadas en la superficie son transferidas a la atmósfera, en la que continuamente están en contacto con otras partículas, con las que pueden chocar y ser retenidas, o ser rebotadas por el impacto. En este proceso, pueden permanecer en su forma original o reaccionar con otras para formar partículas secundarias.

Lo anterior explica la complejidad que tiene la dinámica de las partículas, debido a que sus interacciones se desarrollan de manera muy diversa dependiendo de factores meteorológicos que influyen en su comportamiento; entre éstos, podemos destacar la temperatura, la precipitación, la dirección y velocidad del viento, y la combinación de las condiciones anteriores durante las estaciones del año.

I. Temperatura

En general, la presencia de temperaturas bajas en el aire puede mejorar su calidad, debido a que la emisión de muchos contaminantes puede disminuir, aunque esta situación ocurre principalmente en los gases (Díaz et al., 1999).

Por otra parte, este factor puede influir en el movimiento de las partículas debido a la termoforesis (gradiente térmico), por la que se desplazan de una región caliente a una fría (Petroff & Zhang, 2010; Janhäll, 2015), aunque actualmente la influencia de este efecto no es comprendida por completo.

En relación a lo anterior, durante la presencia de inversiones térmicas las partículas aumentan su tiempo de residencia y por tanto su probabilidad de ser depositadas (Tiway & Colls, 2010: 301).

II. Precipitación

La atmósfera remueve contaminantes por procesos naturales de deposición, entre ellos la precipitación; mecanismo por el que las gotas colectan partículas que son transferidas a superficies de contacto en la corteza terrestre. Por esta razón, la concentración de contaminantes atmosféricos puede disminuir después de la ocurrencia de este fenómeno.

Por otra parte, la lluvia puede aumentar las condiciones de humedad en la atmósfera y con ello favorecer procesos deliquescentes y de crecimiento higroscópico, lo que puede dar lugar a reacciones de formación de partículas secundarias y de reproducción de microorganismos en la atmósfera.

III. Dirección y Velocidad del Viento

La dirección y velocidad del viento pueden movilizar el material particulado, influyendo en su tiempo de residencia en la atmósfera.

Por su parte, la dirección puede explicar el origen y destino de los contaminantes, de manera que se pueden localizar las fuentes principales de emisión y los territorios que estarán expuestos a ellos.

Además, las partículas pueden modificar su trayectoria y velocidad por la presencia del efecto cañon urbano en avenidas con edificios altos, o al pasar a través de otros obstáculos como las barreras de vegetación (Janhäll, 2015).

También se puede aumentar el tiempo de residencia de las partículas cuando existen valores bajos de velocidad, debido a que estos contaminantes se desplazan de manera más lenta.

IV. Temporada del año

Las variaciones climatológicas durante el año crean efectos combinados que pueden influir en la dinámica de las partículas en la atmósfera.

Puede haber incrementos en la concentración de contaminantes durante la temporada fría y seca de un territorio (invierno), debido a que los gases y partículas se dispersan de manera más lenta a bajas temperaturas, además de que la ausencia de humedad hace que los procesos de limpieza atmosférica de contaminantes sean más lentos (Díaz et al., 1999).

En épocas cálidas y secas, y con ausencia de viento (primavera), las concentraciones también pueden aumentar, debido a que no existen flujos que dispersen los contaminantes.

Por otra parte, cuando existen condiciones de elevada humedad y temperatura (verano) las partículas deliquescentes o higroscópicas pueden favorecer la formación de smog.

También deben considerarse las épocas de floración de la vegetación urbana (generalmente en primavera), en las que se incrementan las concentraciones de partículas de polen, lo que puede producir complicaciones en personas alérgicas.

A. Mecanismos de la dinámica atmosférica

Las variables meteorológicas presentadas determinan en gran medida el comportamiento de las partículas, en el que la deposición y la resuspensión o rebote son los mecanismos principales que explican la interacción de las partículas atmosféricas con diversas superficies de contacto.

Estos mecanismos no son unicastales y dependerán principalmente de las características de las partículas, de las superficies de contacto y las condiciones atmosféricas antes mencionadas; la conjunción de estas tres condiciones determinará la eficiencia de colecta y el modo en que estos fenómenos ocurren.

En este sentido, se reconoce que las partículas más grandes son más fáciles de ser depositadas, debido a que por su tamaño y peso se depositan a velocidades mayores que las partículas finas (Freer-Smith et al., 2005). Esto puede explicar la presencia de partículas más grandes en la cercanía de sus fuentes emisoras (Grantz et al., 2003).

Otros factores que influyen en la deposición de material particulado son la adhesividad (Janhäll, 2015) y rugosidad (Sawidis et al., 2012) presentes en la superficie de contacto.

A1. Deposición

Las partículas no permanecen suspendidas de manera permanente en la atmósfera, sino que en función de su tamaño, forma, peso, y condiciones meteorológicas son removidas a través del proceso conocido como deposición atmosférica, entendido como el transporte de una partícula o gas de un punto del aire hacia una superficie de contacto.

Este proceso fundamenta la ocurrencia de los ciclos hidrológico y biogeoquímicos, debido a que representa el mecanismo natural en el que la atmósfera transfiere partículas suspendidas y gases a superficies de la corteza terrestre, como el suelo, los cuerpos de agua y la vegetación. Entre estas sustancias también algunas partículas contaminantes pueden ser transferidas como SO_4 , NO_3 , NH_4 , partículas radioactivas, cationes y metales

pesados, que pueden causar modificaciones perjudiciales en los ecosistemas (Petroff et al., 2008).

La deposición se puede manifestar en tres formas dependiendo de las condiciones de humedad presentes en la atmósfera: deposición seca, deposición húmeda y deposición oculta; se describen brevemente a continuación.

A1.1 Deposición seca

La deposición seca ocurre en condiciones de baja humedad atmosférica, por influencia de procesos involucrados en el movimiento de las partículas y la capacidad de las superficies de contacto para colectarlas. Por tanto, depende en gran medida del diámetro aerodinámico de las partículas y la rugosidad presente en la superficie de contacto.

Este tipo de deposición suele ser el más lento en comparación con los otros, aunque en territorios con clima árido o temporadas secas prolongadas, es el que más persiste durante el año, además de afectar a todas las superficies expuestas (Grantz et al., 2003).

Los mecanismos principales que determinan este fenómeno son la difusión por movimiento browniano, la intercepción, la impactación inercial y la sedimentación (Petroff, 2008: 3630). Se revisan a continuación (Figura 1.3).

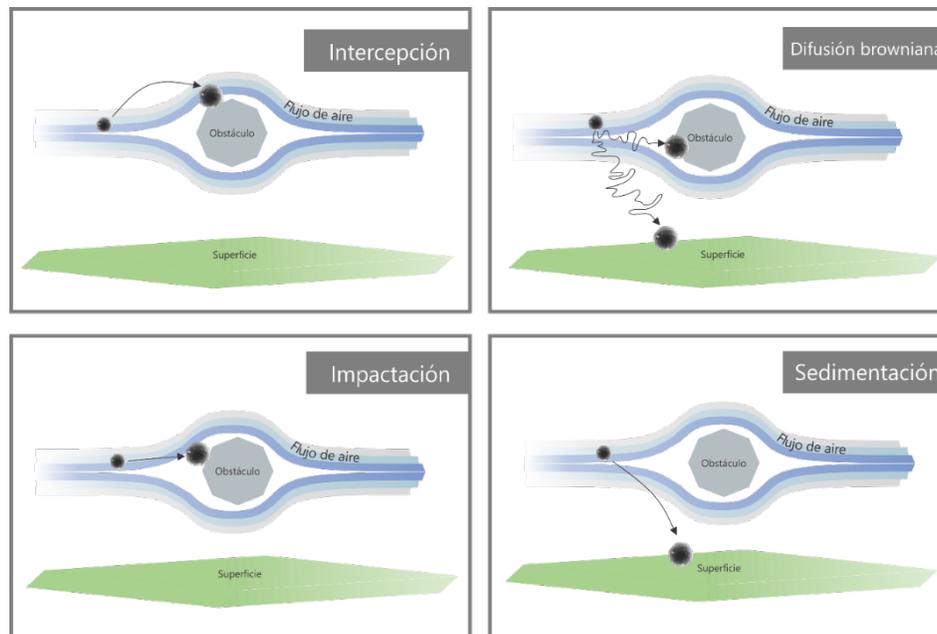


Figura 1.3. Mecanismos de deposición seca. Elaboración propia con base en Lagzi et al. (2013).

i. Difusión Browniana

La difusión por movimiento browniano ocurre por colisiones aleatorias entre las partículas o de una partícula con obstáculos más grandes, que son arrastradas hacia una capa límite adyacente a la superficie de contacto (Tiway & Colls, 2010; Lagzi et al., 2013). El arrastre ocurre por la existencia de un gradiente de concentración que induce un flujo de masa hacia dicha superficie (Litschke & Kuttler, 2008).

Este mecanismo afecta principalmente la deposición de partículas finas ($<0.1\mu\text{m}$) (Litschke & Kuttler, 2008; Petroff et al., 2008), por lo que es responsable de las altas velocidades de deposición presentes en esta fracción (Fowler et al., 2009).

En capas muy delgadas sobre la superficie ($\leq 1\text{ mm}$) la difusión browniana puede afectar también a las partículas más grandes (Lagzi et al., 2013).

ii. Intercepción

La intercepción ocurre cuando las partículas con poca inercia que siguen un patrón de flujo quedan retenidas en los bordes de un obstáculo (Lagzi et al., 2013). Esto ocurre cuando la distancia entre el centro de la partícula y la superficie de contacto es más pequeña que la mitad de su diámetro, por lo que su ocurrencia está en función del diámetro de la partícula y la microrugosidad presente en la superficie (Petroff et al., 2008: 3630).

Este mecanismo es eficiente en la deposición de partículas más grandes ($>0.5\mu\text{m}$) (Tiway & Colls, 2010: 303) y poco significativa en partículas menores a $0.1\mu\text{m}$ (Litschke & Kuttler, 2008), aunque es menos efectivo que la difusión por movimiento browniano y la sedimentación por gravedad (Fowler et al., 2009: 5235).

iii. Impactación inercial

De acuerdo con Litschke & Kuttler (2008) y Lagzi et al. (2013), la impactación ocurre cuando las partículas no pueden seguir un patrón de flujo al pasar alrededor de un obstáculo, debido a que su inercia es muy grande, por lo que quedan retenidas en el obstáculo.

La captura de partículas por este mecanismo ocurre en el rango medio de diámetro aerodinámico, de entre $1\text{ y }0.1\mu\text{m}$, aunque su eficiencia se reduce conforme las partículas son más pequeñas.

iv. Sedimentación

En la sedimentación las partículas caen por fuerza de gravedad (Petroff et al., 2008: 3631) debido a su tamaño, que suele ser mayor a 10 μm . Esta característica suele hacer a las partículas más pesadas respecto a otras fracciones, lo que contribuye a incrementar su velocidad de deposición (Litschke & Kuttler, 2008: 231).

A1.2 Deposición húmeda

La deposición húmeda ocurre cuando partículas y gases se unen a través de procesos de nucleación, formando gotas de lluvia que después precipitan, y con ello son removidas de la atmósfera. En este sentido, las partículas pueden constituir Núcleos de Condensación de Nubes (*Cloud Condensation Nuclei*, CCN), en las que gotitas de agua se puedan adherir, o pueden ser lavadas de la atmósfera durante la ocurrencia de este fenómeno (Tiwary & Colls, 2010).

Se reconocen dos formas en las que la deposición húmeda puede llevarse a cabo: la precipitación en forma de lluvia o nieve (*rainout*), o el barrido/lavado (*washout*), que ocurre mediante un arrastre de partículas por debajo de la nube (Grantz et al., 2003) (Figura 1.4).

En ambos procesos, la deposición húmeda puede depositar, redistribuir, transferir o resuspender las partículas suspendidas en la atmósfera o que estaban previamente depositadas en alguna superficie, de acuerdo a la intensidad y duración del fenómeno, siendo más común que estos procesos afecten a la fracción gruesa de las partículas (Grantz et al., 2003; Tiwary & Colls, 2010)

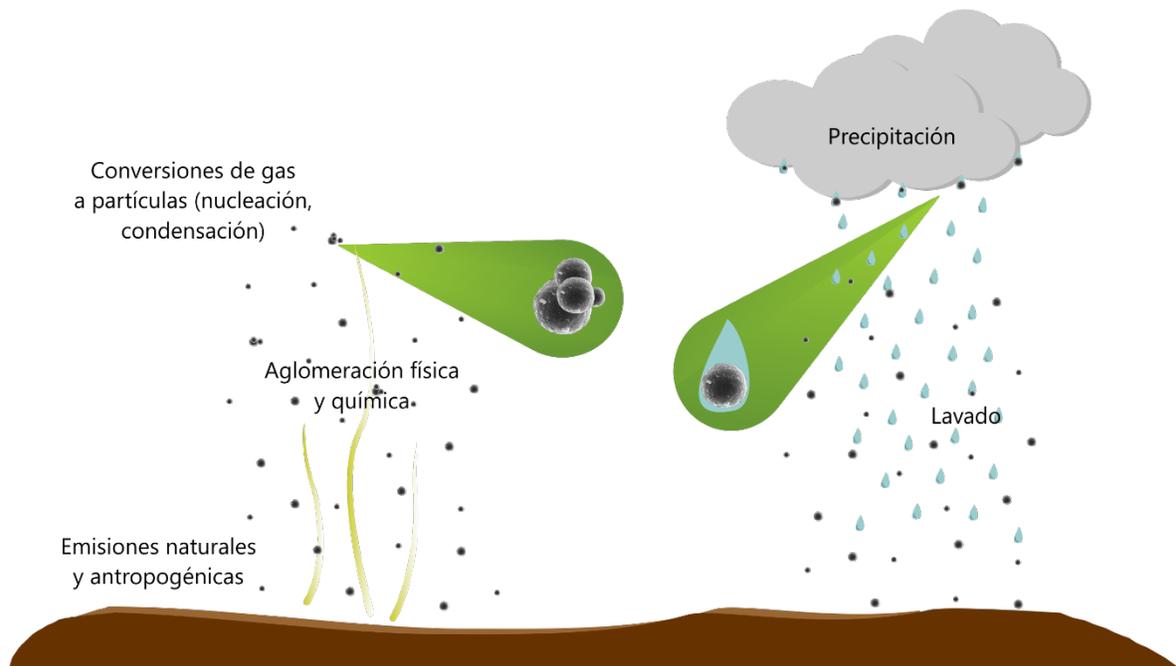


Figura 1.4. Procesos que intervienen en la deposición húmeda. Modificado de Lagzi et al. (2013).

En relación a la formación de gotas, debe destacarse la función de la humedad relativa, que influye directamente en el crecimiento higroscópico, y por tanto la velocidad de deposición de las partículas. En este sentido, debe considerarse que en territorios con climas húmedos las mediciones de material particulado con muestreadores volumétricos pueden encontrar partículas más grandes debido a su crecimiento higroscópico (Tiwary & Colls, 2010).

A1.3 Deposición oculta

La deposición oculta ocurre cuando las partículas y gases son disueltos en las gotitas que forman parte de la niebla, neblina y de nubes orográficas; por esta razón, algunos autores la consideran un proceso de deposición húmeda; no obstante, debido a las características y condiciones particulares, es importante tomarla en cuenta de forma separada.

Este fenómeno ocurre por la propiedad de algunas partículas para disolverse o coalescerse durante la condensación acuosa, entre éstas algunas contaminantes como el NO_3 , NO_4 , SO_4 , NH_4 y compuestos orgánicos. En este sentido, a pesar de que la ocurrencia de este tipo de deposición es menos frecuente que los otros, su grado de afectación puede ser

mayor debido al aumento en la concentración de acidez respecto a otros tipos de deposición.

Sin embargo, la deposición oculta se limita casi por completo a sitios con altitudes elevadas como las áreas montañosas y a zonas costeras, aunque también se presenta en sitios con emisiones elevadas de contaminantes (Grantz et al., 2003).

A2. Rebote y resuspensión

El rebote y resuspensión de partículas puede impedir la deposición, o bien, ocurrir después del depósito cuando el viento, el agua u otras partículas chocan con otras partículas previamente depositadas en una superficie de contacto. Esto afecta principalmente a partículas mayores a 5 μm .

Este mecanismo está relacionado con la velocidad de la partícula, la naturaleza del impacto y las condiciones de adhesión (Petroff et al., 2008: 3631), además de estar influenciado principalmente por la acción del viento y la precipitación (Tiwary & Colls, 2010: 400), que aunadas a la poca afinidad de la partícula con la superficie de contacto, pueden favorecer su movilización.

Se presenta en la figura 1.5 la interacción de estos tres tipos de deposición dentro de la dinámica atmosférica de las partículas y gases.

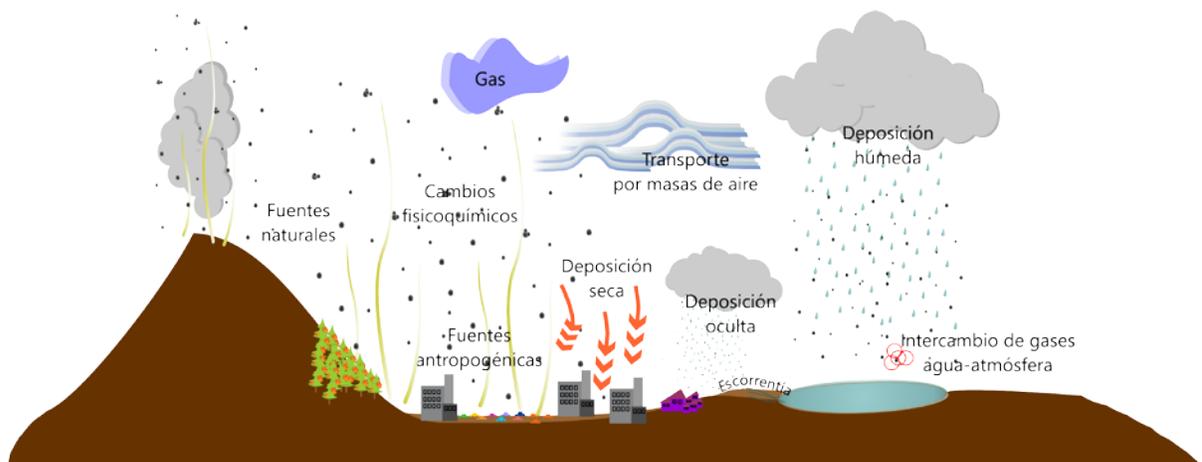


Figura 1.5. Procesos de emisión, transporte y deposición atmosférica (EPA, 2000).

1.1.4. Efectos del material particulado en la salud y el ambiente

La presencia de material particulado en la atmósfera es parte fundamental de los procesos de intercambio con la litósfera, la biósfera y la hidrósfera, mediante el transporte constante de materiales, como el polen, que permite la reproducción de especies vegetales.

También en las partículas se pueden encontrar virus y otros microorganismos, que utilizan este medio para desplazarse y reproducirse; polvos derivados de la erosión del suelo, cenizas y otras partículas litogénicas que forman parte de los ciclos biogeoquímicos que ocurren en el planeta.

Otros procesos llevados gracias a la presencia de material particulado están relacionados directamente con el intercambio de agua, al constituir núcleos de condensación de las nubes (CCN), sin los cuales las micropartículas de vapor de agua no podrían unirse y dar lugar a la formación de lluvia. En este sentido, las partículas de hollín con sulfatos pueden ser precursoras de la lluvia ácida al estar en contacto con el vapor de agua (Tiwary & Colls, 2010:356).

No obstante estos procesos mencionados, tal vez la principal razón por la que el material particulado es estudiado y tomado en cuenta por instituciones gubernamentales es por los efectos negativos que ocasiona en la salud humana y de otros seres vivos cuando supera las concentraciones que se encuentran naturalmente en la atmósfera.

Aunque actualmente no existe evidencia suficiente para identificar las diferencias en los efectos específicos de las partículas de acuerdo a su composición química o emanación de diversas fuentes, se han asociado algunas perturbaciones basadas principalmente en el tamaño de la partícula. En este sentido, las evidencias son más consistentes en la peligrosidad del material particulado proveniente de emisiones de combustión de escapes de motores de fuentes fijas y móviles (WHO, 2013).

A. Efectos en la salud

Incrementos en la morbilidad y mortalidad cardiovascular y pulmonar han sido asociados con la presencia de altos niveles de material particulado (Arciniégas, 2012; Forsberg et al., 2005; Vlachokostas et al., 2012).

Se estima que aproximadamente 3% de las muertes por causas cardiopulmonares a nivel global están asociadas con elevados niveles de material particulado (WHO, 2013: 7), aunque también se han encontrado incrementos en la tasa de mortalidad relacionados con este contaminante a niveles más bajos que los permisibles, o cuando la exposición es constante (Rodríguez et al., 2014).

En cuanto a grupos poblacionales, se reconoce que las personas con predisposición a enfermedades pulmonares o cardíacas, adultos mayores y niños pueden ser más vulnerables a los efectos del material particulado (Tiwary & Colls, 2010; WHO, 2013). Los adultos son más propensos a reducir su esperanza de vida (Forsberg et al., 2005), mientras que la población infantil puede tener afectaciones en el desarrollo de los pulmones y deficiencia en sus funciones al exponerse a este contaminante (WHO, 2013).

El material particulado puede ingresar al organismo mediante diferentes vías, una de ellas, y tal vez la principal, es mediante la respiración. Pese a la existencia de pasajes sinuosos, vellos nasales, cilios, revestimientos húmedos y secreciones constantemente generadas por el organismo para remover las partículas, algunas de ellas se depositan y permanecen en el interior del cuerpo, lo que depende de su forma y diámetro aerodinámico, así como de la estructura del sitio de depositación (Tiwary & Colls, 2010: 361).

Se reconoce que las partículas inhaladas suelen medir menos de 100 μm . Las de tamaño superior a los 50 μm son generalmente atrapadas por los vellos nasales, mientras que las partículas mayores a 10 μm son impactadas e interceptadas por las paredes nasales.

Las partículas de la fracción respirable ($\leq 10 \mu\text{m}$) pueden traspasar estas estructuras, penetrar hasta los bronquios, y llegar a los bronquiolos y alveolos pulmonares (Tiwary & Colls, 2010). (Figura 1.6).

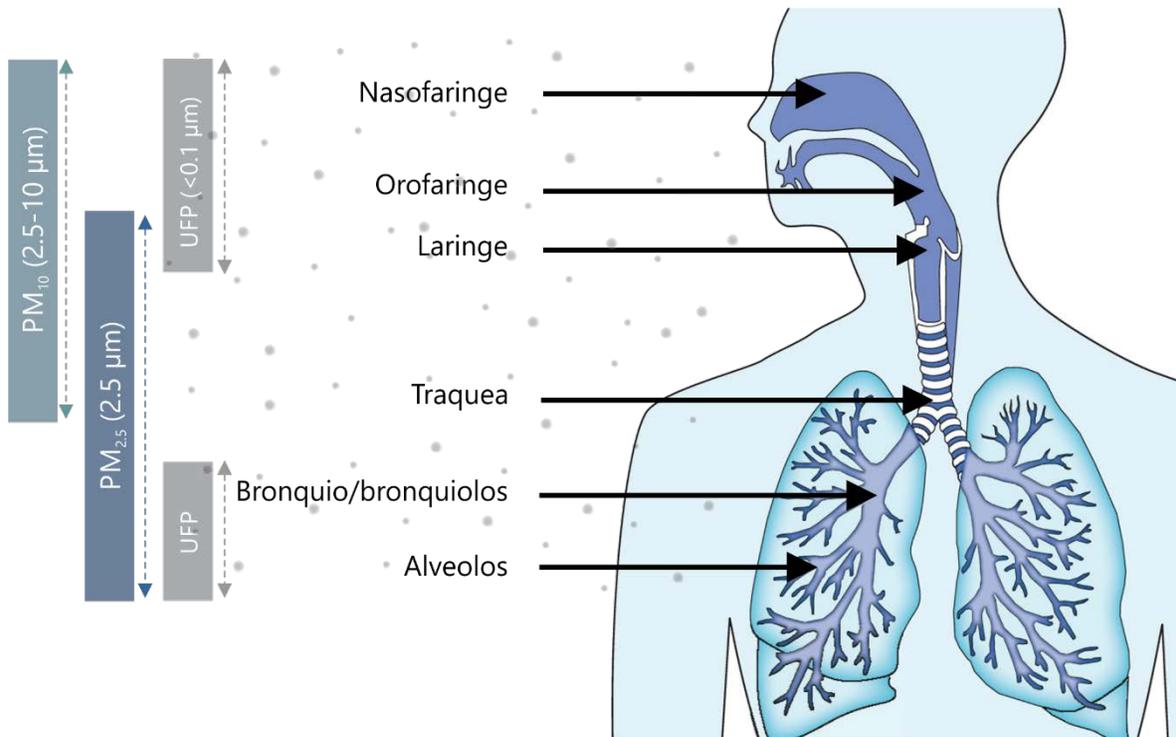


Figura 1.6. Sitios de depositación de las partículas en el aparato respiratorio de acuerdo con el tamaño de la partícula. Guarneri & Balmes (2014).

Se ha encontrado una mayor peligrosidad cardiopulmonar en las partículas más pequeñas que en la fracción gruesa, sobre todo en exposiciones a largo plazo (Araujo, 2011; WHO, 2013); probablemente por la ausencia de cilios y pocas secreciones que no permiten movilizarlas para su posterior eliminación, además de que el impacto o difusión de las partículas en las paredes es muy difícil debido a su baja velocidad terminal (Tiwary & Colls, 2010: 361).

Según Araujo (2011: 80), los efectos provocados por las partículas depositadas en el organismo pueden ser explicados por tres mecanismos: 1) la activación de receptores pulmonares que resulta en un desequilibrio del sistema nervioso autónomo y el desarrollo de disritmias; 2) la inducción de inflamación pulmonar y sistémica; 3) el acceso de partículas o sus componentes químicos a la circulación sistémica.

Con respecto a los trastornos respiratorios que se han asociado a la presencia de este contaminante atmosférico se encuentran la tos y bronquitis crónica, dolor de pecho,

resfriado común, irritación en el tracto respiratorio, tos seca nocturna, asma y cáncer de pulmón (Tiwary & Colls, 2010; WHO, 2013).

Éste último, puede deberse a la presencia de componentes carcinogénicos, mutagénicos y genotóxicos en el material particulado (Arciniégas, 2012), como compuestos orgánicos, SO₂, Cd, Ni y Cr (Freer-Smith et al., 2004), que provienen en su mayoría de escapes de diésel. Se estima que aproximadamente 5% de las muertes por cáncer de pulmón están asociadas al material particulado a nivel global (WHO, 2013).

También se han encontrado efectos aterotrombóticos responsables de graves síndromes coronarios y cardiopatía isquémica, debido a que algunos componentes del material particulado desencadenan y/o intensifican las reacciones de radicales libres en células y tejidos, lo que produce efectos sistémicos pro-oxidantes y pro-inflamatorios (Araujo, 2011; Tiwary & Colls, 2010).

Otros problemas cardiovasculares asociados a la exposición de material particulado son el aumento de riesgo de calcificación aórtica y el engrosamiento íntimo-medio de la arteria carótida (Allen et al., 2009).

Debido a lo anterior, la exposición al material particulado es actualmente reconocida como un importante factor de riesgo cardiovascular a nivel mundial.

Las partículas atmosféricas también pueden ingresar en el organismo por ingestión, al depositarse en los alimentos consumidos en el exterior, o por adherencia de partículas en las manos y su posterior contacto con la boca (Elom et al., 2014). La entrada de partículas por esta vía ocurre principalmente en la fracción gruesa (Tiwary & Colls, 2010: 366), y la población más susceptible es la infantil, debido a que desarrollan gran parte de sus actividades en el exterior (Mielke et al., 1999; Laidlaw & Filippelli, 2008; Shi et al., 2008; citados en Elom, 2014: 210). Otra vía de acceso es la ocular, que puede provocar irritación y conjuntivitis.

Cabe destacar que el organismo humano posee mecanismos para eliminar las partículas dependiendo del sitio de depositación, del tamaño y de su composición (Figura 1.7).

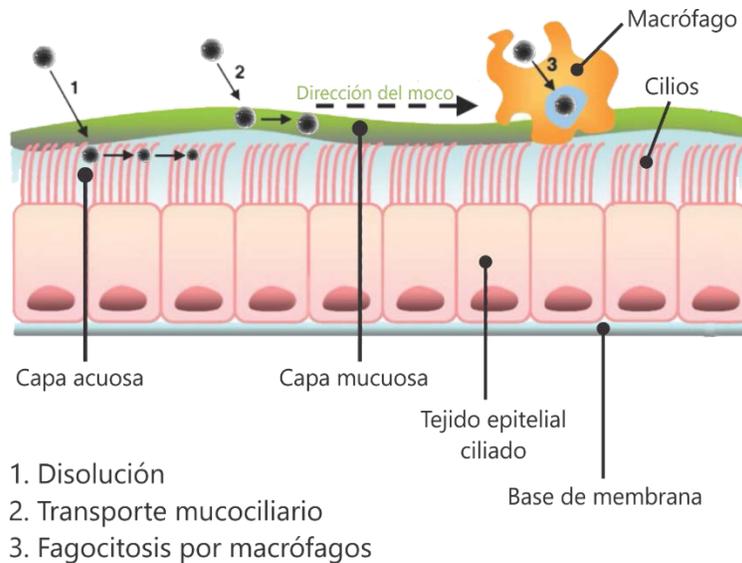


Figura 1.7. Mecanismos de eliminación de partículas en el organismo humano. Modificado de Hussain et al. (2011).

El primero de ellos ocurre al toser o estornudar, acción por la que se pueden eliminar una gran cantidad de partículas. En la región traqueobranquial, previa a la entrada del pulmón, ocurre una remoción por transporte mucociliar, en el que las partículas depositadas en superficies epiteliales son movilizadas por cilios y mucosas hasta la laringe, para su posterior eliminación por estornudos o esputo; este proceso ocurre en un periodo de horas-días (Hussain et al., 2011).

En la región alveolar, carente de mucosa, el proceso de eliminación se lleva a cabo por macrófagos (células blancas) que engullen las partículas y las transportan hacia la región traqueobranquial para ser eliminadas por transporte mucociliar, o movilizadas al sistema linfático o circulatorio; este mecanismo es mucho más lento, ya que ocurre en un periodo de meses-años (Tiwarý & Colls, 2010).

El otro proceso de eliminación ocurre por absorción de partículas en el sistema circulatorio al ser disueltas en el torrente sanguíneo; la duración de este mecanismo es muy variable, debido a que depende en gran medida de la solubilidad de la partícula.

Es importante mencionar que a constantes y elevadas concentraciones de material particulado la capacidad del sistema inmunológico para eliminar partículas puede verse disminuida o tener una velocidad de remoción muy lenta, causando graves afectaciones

durante el periodo en que las partículas permanecen dentro del organismo, cuya gravedad dependerá de la composición de la partícula, del sitio de alojamiento y la sensibilidad de la persona a este contaminante.

B. Efectos en la vegetación

Además de los trastornos asociados a una disminución en la salud humana, existen otros efectos considerables sobre los ecosistemas provocados por la deposición de contaminantes en la vegetación, que interactúan con las superficies de contacto o entran a los tejidos de la planta.

Cuando la cantidad de material particulado depositado sobre la superficie de las hojas es considerable, la actividad fotosintética puede verse disminuida debido a la obstrucción de radiación solar que llega a la hoja, lo que a su vez puede influir en el crecimiento de las plantas.

Las partículas también pueden causar afectaciones en el proceso de transpiración e intercambio gaseoso, mediante la obstrucción de las lenticelas en la corteza y los estomas en las hojas. De este modo, las partículas de diámetro inferior al del estoma ($<10\text{-}20\mu\text{m}$, dependiendo de la especie) pueden penetrar al tejido interno de las hojas cuando éstos se abren, sitio donde pueden reaccionar con otras sustancias y causar modificaciones en el metabolismo de la planta (Figura 1.8).

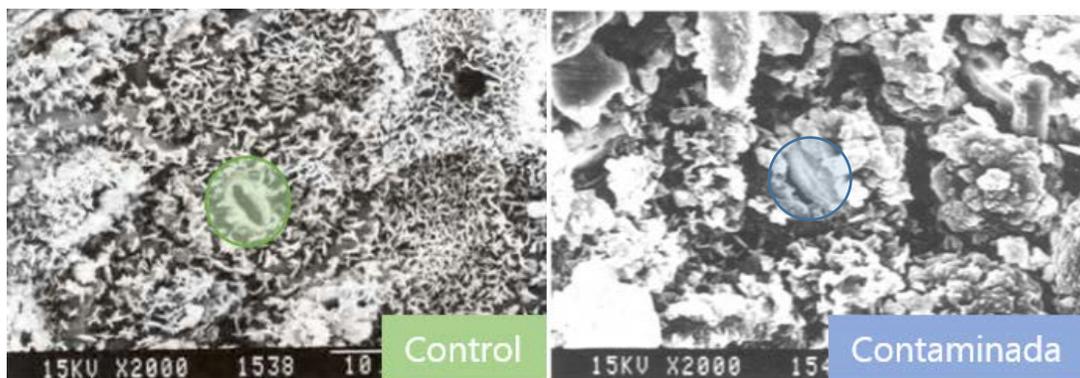


Figura 1.8. Modificación de los estomas por la presencia de partículas en *Cassia fistula*. Modificado de Kulshreshta et al. (2009).

*El círculo verde señala el estoma en la muestra control. En la muestra contaminada, los estomas se han cerrado (círculo azul) y la cutícula se ha degradado.

Por otra parte, en condiciones de alta humedad ambiental o en hojas humedecidas, algunas partículas de sales deliquescentes pueden degradar la cutícula protectora de las hojas, afectando el intercambio gaseoso y haciendo las hojas más vulnerables a la sequía, situación que ha sido demostrada en especies de coníferas por Burkhardt & Pariyar (2014).

Las partículas también pueden afectar la vegetación al ser transferidas al suelo, efecto que puede ser incluso más perjudicial que su introducción a través de las hojas; esto debido a que se puede disminuir el pH del suelo, modificando el crecimiento de las raíces finas y la absorción de nutrientes por parte de la planta (Grantz et al., 2003; Tiwary & Colls, 2010).

Los efectos antes mencionados deterioran las estructuras de la vegetación y pueden dar lugar a la modificación del metabolismo general de las plantas, que puede ser perjudicial para su crecimiento y reproducción. Aunado a esto, el debilitamiento de la vegetación puede hacerla más vulnerable al ataque de plagas o enfermedades, cuyos daños pueden ser perceptibles en cambios de coloración, defoliación o deformidad en las hojas.

Además, pueden existir efectos secundarios asociados a las partículas depositadas en la vegetación, alterando las relaciones simbióticas con estas especies, o siendo ingeridas por otros organismos y bioacumuladas o metabolizadas.

Otros efectos indirectos están asociados a la modificación de ciclos biogeoquímicos del N, S, y Al (Grantz et al., 2003).

No obstante, algunas plantas poseen la capacidad de adaptarse a las condiciones de contaminación presentes en las zonas urbanas, tolerando ciertos grados de concentraciones suspendidas y depositadas (Figura 1.9). En este sentido, Grantz et al. (2003) mencionan que las afectaciones en la vegetación se manifiestan de manera considerable cuando se rebasan los niveles de exposición a los que comúnmente se encuentran.

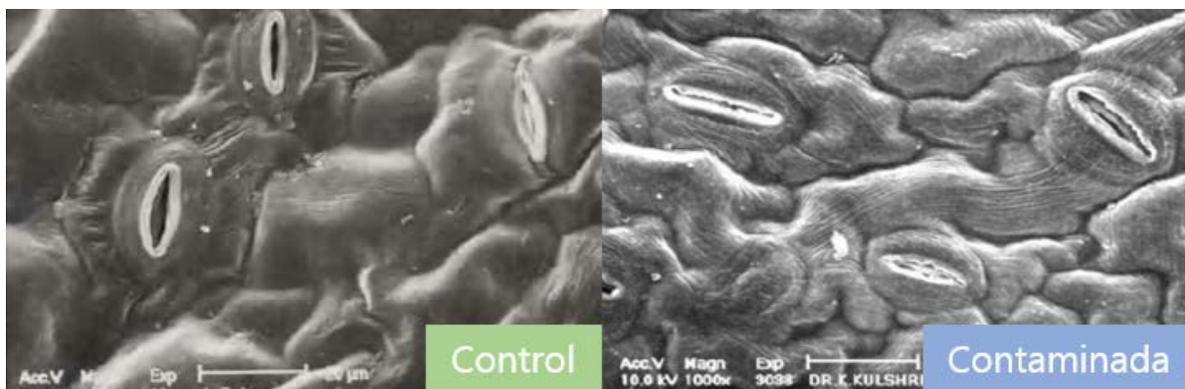


Figura 1.9. Daño poco significativo en estomas de *Bouganvillea* 'Mahara'. Modificado de Kulshreshta et al. (2009).

*Los estomas de la hoja muestran daños leves, por lo que los autores concluyen que esta especie puede ser utilizada como mitigadora de la contaminación ambiental.

Además, de acuerdo con Lin & Schuepp (1995; citados en Beckett et al., 1998), los efectos en los árboles pueden ser relativamente mínimos en comparación a los problemas de salud que podrían causar en humanos.

Por lo anterior, las áreas verdes, sobre todo arboladas, pueden ser consideradas como estrategia en la filtración de material particulado, teniendo en cuenta que el grado de afectación sobre las plantas puede disminuirse con densidades altas de vegetación, de modo que las concentraciones sean proporcionalmente de menor impacto por cada ejemplar.

C. Efectos en la visibilidad e infraestructura urbana

El material particulado puede disminuir la visibilidad cuando se encuentra en concentraciones elevadas. Al respecto, las partículas finas suelen ser las causantes mayoritarias de este problema, sobre todo las que se encuentran en el rango de entre 0.3 y 0.7 μm ; la fracción gruesa suele contribuir también, aunque con una eficiencia de la mitad a un tercio de la que ejercen las partículas finas (Health Canada, 2004: 9).

En este sentido, organismos como las aves e insectos pueden sufrir desorientación mientras que el sector transporte puede ser también afectado, aumentando el riesgo de accidentes viales.

Además, la disminución de la visibilidad en la atmósfera puede modificar el balance de radiación y con ello los perfiles térmicos (Grantz et al., 2003), efectos causados principalmente por partículas de carbono elemental y sulfatos, que se caracterizan por su capacidad para absorber grandes cantidades de luz y calor.

También puede existir deterioro en la infraestructura urbana debido a la acción corrosiva de algunas partículas, principalmente sulfatos, cloruros y nitratos, que con la humedad atmosférica degradan superficies de cemento y otros materiales metálicos. Otro problema es la suciedad constante de paredes, sobre todo en sitios cercanos a las fuentes de contaminación, que puede ocasionar molestias en muchos habitantes por el esfuerzo que implica su limpieza.

1.2 ÁREAS VERDES URBANAS

Las áreas verdes, zonas verdes o espacios verdes son un concepto asociado directamente a las ciudades, y se definen como cualquier espacio libre en el que predominen las áreas plantadas de vegetación, espontánea o artificialmente introducida por el hombre (Elía, 1998; citado en Ballester & Morata, 2001).

Estos espacios pueden estar parcial o completamente cubiertos por pasto, árboles, arbustos o cualquier otro tipo de vegetación, incluyendo camellones, parques, jardines, arbolado de alineación, cementerios, entre otros espacios con vegetación abundante (EPA, 2016).

Además, las áreas verdes se caracterizan por ser en su mayoría espacios abiertos, públicos y no urbanizados o con poca infraestructura, destinados principalmente a la recreación, esparcimiento y estética de las ciudades. Además, cumplen con una función relevante en la conservación y mejoramiento del ambiente urbano, al tiempo que pueden representar un atractivo turístico (EPA, 2016).

Respecto al diseño de las áreas verdes, Gilbert (1989; citado en Álvarez, 1996) identifica tres enfoques o niveles de estructuración:

1. Enfoque tecnológico, en el cual los paisajes naturales son reemplazados por substitutos artificiales. Este tipo de diseño domina en los centros de las ciudades y se caracteriza por ser muy costoso, ya que usa maquinaria y materiales artificiales como el concreto para su construcción. Su topografía rara vez es natural debido a los rellenos y cortes, además que utiliza poca variedad de especies vegetales.
2. Enfoque tipo jardín, que está construido en función de la estética, ya que resalta principalmente valores artísticos y hortícolas. La vegetación que utilizan necesita un constante mantenimiento.
3. Enfoque ecológico, en el que predominan flora y fauna silvestre (elementos naturales); pueden variar en tamaño, sus límites son informales y pueden ser zonas de transición (ecotonos). Presentan especies adaptadas al sitio, por lo que requieren cuidados y gastos mínimos.

Considerando lo anterior, y en el contexto de este trabajo, el concepto de áreas verdes se entenderá como los espacios de uso público, constituidos por vegetación natural o introducida que se encuentran dentro del ambiente urbano en uno o varios estratos vegetales, desde pastos hasta espacios arbolados de mayor extensión y complejidad.

Se reconoce además a estos espacios como ecosistemas, en los que suceden interacciones entre diversos organismos vivos, y que proporcionan servicios ecosistémicos, por lo que además de mejorar la imagen urbana, contribuyen a mantener la salud ambiental y la calidad de vida de los habitantes de una ciudad.

1.2.1. Servicios ecosistémicos en Áreas Verdes Urbanas

Relacionado con el concepto de áreas verdes planteado en este trabajo, y de acuerdo con la definición del Convenio sobre la Diversidad Biológica (ONU, 1992), se concibe a un ecosistema como un complejo dinámico de comunidades vegetales, animales, microorganismos y el medio abiótico, que interactúan como una unidad funcional.

Aunque los niveles de biodiversidad, extensión, beneficios ambientales y conservación de los ecosistemas urbanos son mucho menores en comparación con otros biomas silvestres (bosques, selvas, desiertos, matorrales, esteros), en las áreas verdes también ocurren estos procesos, aunque de forma distinta.

En estos ecosistemas existen relaciones complejas, ya que además de las interacciones biológicas se añade el componente social, lo que les confiere características particulares y plantea nuevas posibilidades de estudio para el entendimiento de su estructura y dinámica.

Por esta razón, las áreas verdes urbanas representan una oportunidad de generar modelos de desarrollo sustentable, mediante la valoración de la naturaleza y del aprovechamiento de los servicios ecosistémicos que otorgan.

Los servicios ecosistémicos son los beneficios (tangibles e intangibles) que las personas obtienen de los ecosistemas, tanto naturales como modificados por el hombre (Millenium Ecosystem Assessment, 2003); incluyen los servicios de provisión o suministro, de regulación, culturales y de base o soporte (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2. Servicios ecosistémicos

Servicios de provisión o suministro	Productos que se obtienen de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alimentos, fibra y agua dulce ▪ Combustible ▪ Recursos genéticos ▪ Recursos bioquímicos, medicinas naturales y farmacéuticos ▪ Recursos ornamentales
Servicios de regulación	Beneficios que se obtienen de la regulación de los procesos de los ecosistemas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mantenimiento de la calidad del aire ▪ Regulación climática y del agua ▪ Control de la erosión ▪ Purificación del agua y tratamiento de residuos ▪ Regulación de enfermedades humanas ▪ Control biológico y polinización ▪ Protección ante tormentas
Servicios culturales	Beneficios intangibles que se obtienen de los ecosistemas, a través del enriquecimiento espiritual, el desarrollo cognitivo, la reflexión, recreación y experiencias estéticas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diversidad cultural, valores espirituales y religiosos ▪ Sistemas de conocimiento (formal y tradicional) ▪ Valores educacionales ▪ Valor estético e inspiración ▪ Relaciones sociales ▪ Patrimonio cultural ▪ Recreación y ecoturismo
Servicios de base o soporte	Servicios necesarios para la producción de los demás servicios de los ecosistemas; su impacto es indirecto o a largo plazo.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Producción primaria (fotosíntesis) ▪ Producción de oxígeno atmosférico ▪ Formación y retención de suelo ▪ Ciclo de nutrientes ▪ Ciclo del agua ▪ Hábitat

FUENTE: Millenium Ecosystem Assessment (2003).

En este contexto, las áreas verdes pueden contribuir significativamente a la mejora de la calidad ambiental de una ciudad mediante el suministro de diversos servicios ecosistémicos, como los que se presentan a continuación.

A. Provisión

Los servicios de provisión en las ciudades son relativamente pocos en comparación a los otros beneficios, ya que las necesidades de agua, alimentos, combustible y otros recursos incluidos en esta categoría suelen tener un origen externo de las zonas urbanas.

Esta situación de abastecimiento, aunque generadora de empleos, crea necesidades de transporte y almacenamiento, que conllevan impactos ambientales en territorios distintos a la ciudad como el agotamiento del suelo, emisiones atmosféricas, mala distribución de alimentos, escasez de agua en territorios de origen, entre otros.

En este sentido, ciudades principalmente europeas y estadounidenses están desarrollando iniciativas de autoabastecimiento de recursos en áreas verdes urbanas, utilizando estrategias como la captación de agua de lluvia, el establecimiento de huertos urbanos comunitarios, la implementación de sistemas hidropónicos, la obtención de energía de fuentes renovables, el reciclaje de agua, por citar algunas.

Lo anterior plantea la oportunidad de utilizar a las áreas verdes como estrategia que contribuya de manera complementaria a satisfacer las necesidades de provisión de recursos en una ciudad, al tiempo que promueve la soberanía alimentaria de su territorio.

B. Regulación

Respecto a los servicios de regulación, se ha documentado que las áreas verdes influyen directamente en la mejora de la calidad del aire de una ciudad, mediante su capacidad para interceptar partículas en suspensión y gases contaminantes (Nowak et al., 1998; Sorensen et al., 1998).

Además, estos espacios contribuyen al control climático regional y local de un territorio; beneficio otorgado en gran parte por el estrato arbóreo que disminuye la temperatura mediante el sombreado y la transpiración; modifica la dirección y velocidad del viento debido a la forma y tamaño de la copa; e incrementa la humedad ambiental (Nowak et al., 1998, 2000; Barradas, 2000).

La vegetación presente en una ciudad proporciona cobertura al suelo, lo que disminuye su exposición a factores que permiten su erosión, como el viento y el agua. Además contribuyen a la disminución de la escorrentía en territorios urbanos, al almacenar agua de lluvia en sus tejidos o infiltrarla a través de su sistema de raíces; este último hecho puede disminuir las inundaciones en territorios urbanos (Zhang et al., 2012).

Además, el agua de lluvia que logra infiltrarse es purificada previamente en los espacios verdes (Yang et al., 2015), lo que posibilita una recarga con agua de mejor calidad en comparación a la que sucede en las zonas contaminadas desprovistas de vegetación o en aquellas cubiertas totalmente por asfalto, donde este proceso no ocurre.

En relación a la salud, se ha encontrado que las áreas verdes bien cuidadas contribuyen a mejorar el estado de salud mental de los habitantes al otorgar una sensación de confort y

disminución del estrés en estos espacios (Nowak, 1998). En este sentido, entre mayor sea el tiempo de permanencia de un visitante en un espacio verde, su estado de salud mental y vitalidad puede incrementarse (van den Berg et al., 2016).

C. Culturales

Los servicios culturales otorgados por las áreas verdes son tal vez de los más conocidos y valorados por parte de la población, ya que cumplen con una función recreativa importante que fomenta las relaciones sociales, a través del desarrollo de actividades deportivas, de ocio y convivencia (Dadvand et al., 2016).

Además, las áreas verdes favorecen el aprendizaje de la conciencia ambiental o ecológica, mediante el desarrollo de ejercicios de conocimiento del medio y el fomento de valores ambientales; debido a que estos sitios representan una oportunidad para la comprensión de la dinámica ecosistémica y la importancia de su conservación (Moyano & Priego, 2009).

En relación a esta construcción de conocimientos, la presencia de áreas verdes también posibilita la creación de identidad cultural y capital social (Konijnendijk et al., 2005; Moyano & Priego, 2009). Esta ventaja puede ser favorecida cuando los habitantes de la comunidad son involucrados desde el diseño del proyecto o durante la plantación, lo que fomenta la convivencia vecinal y posibilita el reparto de responsabilidades para el cuidado de estos espacios (Nowak et al., 1998).

También se ha encontrado en países europeos que la presencia de áreas verdes puede aumentar la sensación de seguridad en los habitantes, disminuir las tasas de criminalidad y reducir las expresiones de violencia (Konijnendijk et al., 2005; Moyano & Priego, 2009). No obstante, existen también percepciones contrarias, en las que se argumenta que los árboles oscurecen el alumbrado nocturno y sirven como escondite para los delincuentes, sobre todo en espacios extensos, descuidados y poco iluminados (Philippi & Collet, 1998; Moyano & Priego, 2009).

Sin embargo, para ningún caso se puede establecer una relación directa y única que determine la influencia de las áreas verdes en los índices de criminalidad, debido a que esto depende de factores más complejos.

El valor estético también es importante, ya que es fuente de inspiración, al tiempo que mejora la imagen urbana. En este sentido, una mayor presencia de áreas verdes con un adecuado mantenimiento puede convertirse en un atractivo turístico fuerte dentro de una ciudad, y con ello representar una fuente de ingresos a su economía local.

D. Soporte

Uno de los servicios más importantes de las áreas verdes es la producción de oxígeno, lo que las ha llevado a ser reconocidas con términos como “pulmón de la ciudad”. Este proceso ocurre debido a la fotosíntesis, en la que también se captura y almacena CO₂, importante Gas de Efecto Invernadero (GEI) y causante del Cambio Climático.

En este contexto, las áreas verdes contribuyen también en la regulación de otros ciclos biogeoquímicos como en la fijación de N; y en el ciclo del agua mediante la evapotranspiración e infiltración.

Del mismo modo, las raíces de la vegetación urbana presentes en sitios adecuados otorgan estructura al suelo, por lo que son un factor de formación del mismo. En los primeros estratos también coexisten microorganismos e insectos, principalmente descomponedores, por lo que las áreas verdes son el hábitat para estos seres vivos dentro de una ciudad.

Otros animales más grandes, como las aves, reptiles y mamíferos pequeños encuentran alimento y refugio en el dosel o estratos inferiores de vegetación, además de usar estos sitios para la reproducción y crianza.

De esta manera, los servicios ecosistémicos proporcionados por las áreas verdes tienen una influencia directa en el desarrollo de las actividades económicas, sociales y culturales que se suscitan en la ciudad.

1.2.2. Inconvenientes de las Áreas Verdes Urbanas

No obstante, existen también inconvenientes en las áreas verdes que deben considerarse en la planeación y administración de estos espacios, porque pueden generar molestias en la población, e incrementar los costos y tareas de mantenimiento.

En este sentido, las áreas verdes generan residuos cuando renuevan sus estructuras o durante la floración y fructificación, lo que implica una constante limpieza cuando están sobre superficies asfaltadas, como en camellones angostos o arbolado de alineación.

En espacios verdes más extensos esta necesidad debería disminuir para permitir la dinámica natural y la descomposición en el suelo; sin embargo, desde el punto de vista estético no es muy aceptable, por lo que las tareas de limpieza también se realizan en estos sitios.

Relacionado con la floración, se encuentra la emisión de polen, que puede perjudicar la salud de personas alérgicas en las ciudades durante esta temporada (Leung et al., 2011).

Por otra parte, la caída de ramas, frutos pesados y árboles, sobre todo en organismos viejos o enfermos puede provocar accidentes. Sin embargo, la mayoría de estos riesgos son evitables al considerar el tipo de suelo y las especies adecuadas, realizar una plantación correcta, ejecutar podas sólo cuando son necesarias, y evaluando regularmente el estado del arbolado urbano.

Otra percepción de malestar puede ser provocada por la presencia de fauna en las áreas verdes. Las aves, que habitan en nidos sobre las copas de los árboles generan suciedad; mamíferos pequeños, generalmente roedores, pueden convertirse en plaga al no tener competidores que regulen su población y ser alimentados constantemente por humanos; insectos pueden establecer nidos o panales, que pueden causar sensación de temor en los habitantes cuando son molestados.

Aunado a esto, cuando las áreas verdes aparentan estar descuidadas, pueden también ser usadas como tiraderos de basura y sitios para hacer necesidades biológicas, lo que genera mal aspecto y contaminación en la ciudad.

Casi todas las desventajas mencionadas anteriormente forman parte de la dinámica natural de los ecosistemas, por lo que evitarlos por completo es imposible; sin embargo, en territorios urbanos el riesgo y su percepción puede disminuirse mediante la planeación y el manejo adecuado de estos espacios. En lo que respecta a la presencia de fauna, también es importante incluir tareas de sensibilización y educación ambiental, que permitan a la población comprender y adaptarse a estos fenómenos.

1.3 CAPTURA DE MATERIAL PARTICULADO POR VEGETACIÓN URBANA

La función de la vegetación urbana en la reducción de contaminantes comenzó a valorarse en países europeos a partir de la Revolución Industrial (Tiwary & Colls, 2010). Desde ese momento, diversas investigaciones alrededor del mundo han contribuido en el conocimiento de los mecanismos que permiten a las plantas otorgar este beneficio, por lo que las áreas verdes pueden ser consideradas como una alternativa de biorremediación en ciudades con problemas de contaminación.

Las plantas contribuyen a la disminución de los contaminantes mediante la captura de gases y partículas suspendidas en la atmósfera. Los primeros, pueden ingresar a la planta a través de los estomas de las hojas, difundirse y/o reaccionar en su interior con otras sustancias. Mediante este mecanismo, se ha comprobado la efectividad de las plantas en la disminución de contaminantes gaseosos como SO_2 (Tiwary & Colls, 2010; Hu et al., 2016), metales pesados (Schreck et al., 2012; Poblano, 2013; Dotor, 2014), Compuestos Orgánicos Persistentes (Franzaring & van der Eerden, 2000), e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (Sun et al., 2014).

Respecto a las partículas, la captura ocurre mediante procesos de deposición atmosférica y retención, en la que la vegetación desempeña un papel importante como superficie de contacto.

1.3.1. Mecanismos de captura de material particulado en plantas

En el contexto de la captura de partículas por vegetación urbana, la deposición puede ser entendida como el transporte de un punto del aire a la superficie de la planta (Janhäll, 2015:131).

El material particulado puede pasar a través o por encima de la vegetación, por lo que ésta última puede influir significativamente en la deposición y resuspensión de partículas (Janhäll, 2015: 131-132). En este sentido, la carga, velocidad y dirección de flujo de contaminantes pueden ser modificadas por la vegetación, debido a la creación de corrientes turbulentas que favorecen la captura de partículas, principalmente cuando transitan a través de la misma.

En territorios donde prevalece la deposición seca de partículas, la impactación suele ser el mecanismo dominante por el que el material particulado es depositado en la vegetación (Beckett et al., 2000: 22), aunque Tiwary & Colls (2010) reconocen que la intercepción también puede ser un mecanismo influyente en vegetación con superficies pilosas. En partículas más pequeñas ($<1 \mu\text{m}$) predomina la difusión browniana (Reiners, 1983) (Figura 1.10).

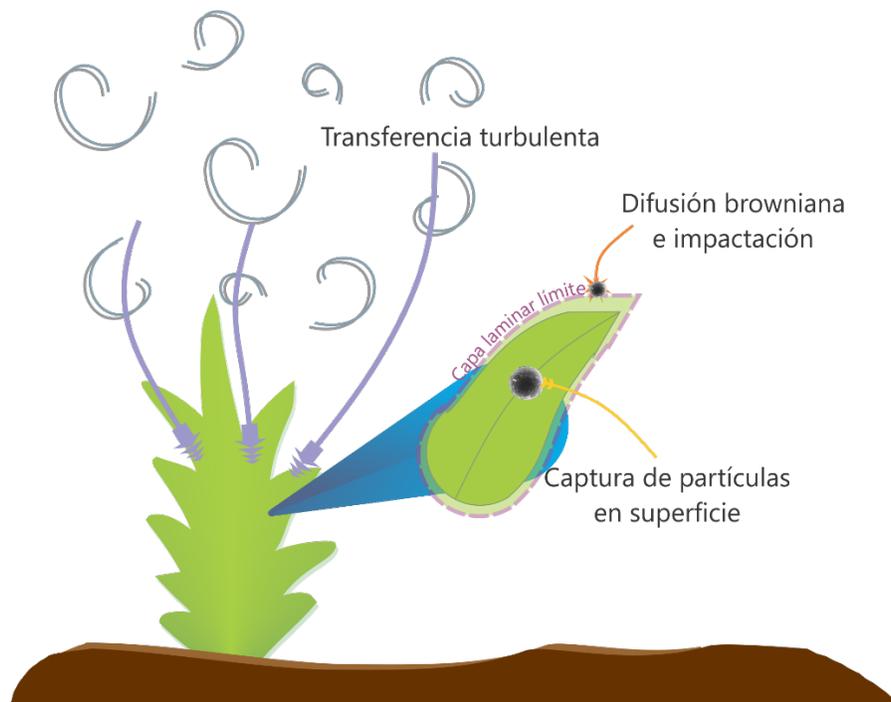


Figura 1.10. Mecanismos de deposición de partículas en la vegetación. Modificado de Fowler (1980; citado en Reiners, 1983).

Por su parte, la deposición húmeda puede redistribuir y/o sumarse a las partículas depositadas previamente por la deposición seca, sobre todo cuando la intensidad y duración de la precipitación no es suficiente para transferir la carga a otras superficies como el suelo (Grantz et al., 2003).

En relación con la transferencia de contaminantes al suelo, la presencia de vegetación puede contribuir en la filtración de partículas y la aminoración de los impactos directos en esta superficie, situación que puede ser ventajosa también para el estado de salud de la planta, ya que Grantz et al. (2003) mencionan que los impactos más grandes del material particulado en la vegetación suelen ocurrir a través de este sustrato.

La deposición oculta también puede ser importante, e incluso más nociva que la deposición seca, a pesar de que se presenta de manera más esporádica.

Diferentes factores pueden influir en estos procesos, de acuerdo al tipo de deposición de las partículas a la vegetación (Cuadro 1.3).

Cuadro 1.3. Efectos en la vegetación causados de acuerdo al tipo de deposición

Tipo de deposición	Determinante de deposición	Factores cuantificables
Deposición seca	Concentración en el ambiente	Distancia a la fuente
		Intensidad de emisión
	Condiciones atmosféricas	Velocidad del viento
		Estabilidad
		Altura de mezclado
		Temperatura
		Humedad
	Propiedades del aerosol	Formación de rocío
		Reactividad química
		Solubilidad de la partícula
		Diámetro aerodinámico
		Disponibilidad biológica
	Rugosidad de la superficie	Higroscopicidad
		Discontinuidad del terreno
		Pubescencia de la hoja
		Forma de la hoja
Densidad de la planta		
Condición de la vegetación	Espacio entre ramas	
	Flexibilidad del tejido	
	Humedad de la superficie	
	Exudados de sales	
	Exudados orgánicos	
Deposición húmeda	Concentración en el ambiente	Excreta de insectos
		Distancia a la fuente
	Condiciones atmosféricas	Intensidad de emisión
		Altura de mezclado
		Ritmo de precipitación
		Intensidad de precipitación
	Propiedades del aerosol	Duración de la precipitación
		Reactividad química
		Solubilidad de la partícula
	Rugosidad de la superficie	Disponibilidad biológica
Discontinuidad del terreno		
Pubescencia de la hoja		
Índice de Área Foliar		
Deposición oculta	Igual que en deposición húmeda	Naturaleza del tallo/tronco y corteza expuesta
		Combinación de factores anteriores

FUENTE: Grantz et al., 2003.

Por otra parte, el material particulado al estar en contacto con la superficie no necesariamente es depositado, ya que puede ser rebotado en ese momento, o resuspendido posteriormente por acción del viento y precipitación. Al respecto, Petroff et al. (2008) mencionan que la resuspensión puede ser potencialmente efectiva en partículas mayores a una micra.

La situación que suceda finalmente con la partícula, en el sentido de su retención o resuspensión, dependerá en gran medida de la presencia de características especiales en las hojas, así como de la afinidad de las partículas con esta superficie, y de las condiciones meteorológicas presentes, atributos desarrollados a continuación.

A. Características de la partícula

Las partículas pueden depositarse sobre la superficie de las hojas o formar parte de sus tejidos, de acuerdo a su diámetro aerodinámico. En general, se reconoce que las partículas más grandes ($>10\ \mu\text{m}$) se establecen sobre la superficie de la hoja, mientras que partículas más pequeñas (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y UFP) pueden depositarse en su interior. Específicamente para el caso de las UFP, éstas tienen un comportamiento similar a un gas, y pueden ser depositadas por difusión (Hinds, 1999; citado en Janhäll, 2015).

Cabe destacar que aunque se ha encontrado que la captura de material particulado en las hojas sucede en mayor proporción en partículas de gran tamaño (Beckett et al., 1998; Sæbø et al., 2012; Przybysz, et al., 2014), la mayoría de trabajos reportan sus resultados en masa y no en número de partículas, por lo que debe también considerarse a las partículas más finas, cuyos efectos en la salud humana y ambiental pueden ser más graves.

Otras características a considerar en las partículas son la capacidad de aglomeración e higroscopicidad, que pueden aumentar su tamaño y dificultar la deposición. La primera de ellas está relacionada con partículas pegajosas o con propiedades reactivas, principalmente biogénicas; la segunda, se refiere a las partículas que constituyen núcleos de condensación o sales, lo que también puede favorecer su crecimiento higroscópico o coalescencia en la hoja (Tiwary & Colls, 2010: 300).

B. Superficie de contacto

Las plantas presentan condiciones más favorables para la captura de partículas en comparación con las edificaciones urbanas, debido a que su arquitectura y forma de crecimiento permite la conformación de cavidades (porosidad) en las que las partículas pueden ser capturadas, al tiempo que obstaculizan la resuspensión.

En este sentido, las áreas verdes pueden estar constituidas en asociaciones de diferentes estratos vegetativos o adoptar únicamente conformaciones aisladas, como el caso de camellones cubiertos de pasto. Se ha comprobado que el estrato arbóreo y arbustivo resultan ser más efectivos para capturar partículas en comparación a cualquier otro tipo de vegetación, como pastos, techos y paredes verdes, esto debido a una mayor rugosidad superficial (Beckett et al., 1998; Currie & Bass, 2008; Barima et al., 2014), y a la estructura y tamaño de las copas, que favorecen la formación de movimientos turbulentos del aire (Fowler et al., 2009).

No obstante, se ha encontrado que la asociación de diversos estratos puede contribuir de mejor manera a la disminución de contaminantes atmosféricos (Currie & Bass, 2008; Weber et al., 2014), lo que puede ocurrir debido a la diversidad de formas de las superficies de contacto, que además permiten otorgar otros servicios ecosistémicos.

En relación a los procesos de deposición y captura de partículas, éstos pueden presentarse en los tallos, troncos y corteza de las plantas (Catinon et al., 2011), sin embargo, la superficie de contacto de mayor extensión es significativamente mayor en el área ocupada por las hojas, por lo que suelen ser estructuras estudiadas en temas de biorremediación.

De acuerdo con lo anterior, este trabajo está enfocado a la captura de partículas en las hojas de los árboles, cuya diversidad en forma, tamaño, densidad, porosidad y presencia de estructuras adherentes condicionarán su capacidad de colecta de partículas.

Al respecto, es pertinente mencionar que las hojas son estructuras de gran importancia para el desarrollo de las plantas, ya que a través de éstas se realiza la fotosíntesis, la respiración, la regulación de la temperatura y contenido de agua, la transformación de nutrientes, la defensa ante competidores y la captura de contaminantes, entre otras funciones (Bussotti & Pollastrini, 2015; Janhäll, 2015).

En general, el tejido superficial de una hoja está constituido por una cutícula cerosa que varía en grosor, en la que se encuentran estomas intercalados (Figura 1.11). Los estomas se caracterizan por tener una forma semicircular y ser relativamente impermeables; miden entre 10-20 μm y están protegidos por pares de células de defensa, que en la mayoría de las plantas (metabolismo C3 y C4) se abren durante el día para permitir el intercambio gaseoso y se cierran durante la noche para conservar energía (Tiwary & Colls, 2010: 331).

Este último mecanismo determina la entrada de partículas en el tejido de la hoja y su posterior almacenamiento o traslado a otras partes de la planta, sobre todo de las partículas más finas, que por su tamaño pueden penetrar fácilmente al interior. Por otra parte, las partículas más gruesas pueden cubrir total o parcialmente los estomas, lo que a su vez puede modificar la capacidad de intercambio gaseoso, y por tanto la actividad fotosintética.

Una elevada densidad y gran tamaño de estomas también se han asociado con una mayor capacidad de las plantas para favorecer la deposición de las partículas en la superficie externa de la hoja (Simon et al., 2014), por lo que esta característica también debe ser considerada en la captura de contaminantes.

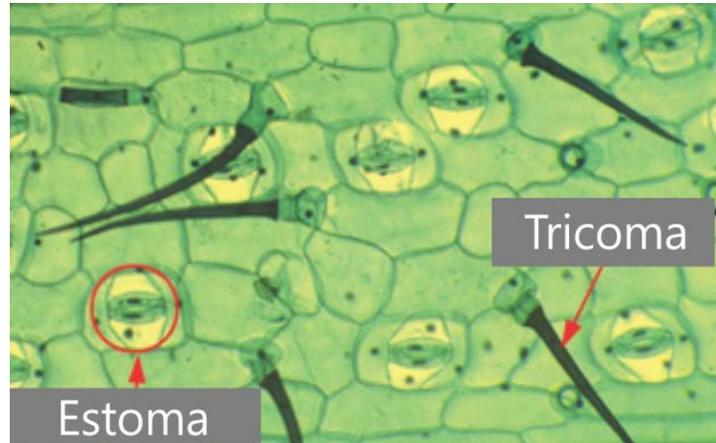


Figura 1.11. Estomas y tricomas presentes en la superficie externa de una hoja. Armstrong (2001).

Otros rasgos a tomar en cuenta en la deposición de material particulado son el área foliar, la rugosidad, la presencia de pilosidades, la adhesividad y grosor de la cutícula, y la presencia de follaje durante el año (perennifolias/caducifolias). Se describen brevemente a continuación.

B1. Área foliar

La superficie total ocupada por las hojas de una planta es llamada Área Foliar (AF). Mediante este parámetro se puede estimar la captación de radiación solar total y la transpiración, variables relacionadas con el crecimiento de la planta. Además, esta medida ha sido utilizada para calcular la cantidad de material particulado depositado por unidad de área y tiempo, por lo que se reconoce que las especies con elevado Índice de Área Foliar poseen condiciones más favorables para la deposición de partículas (Janhäll, 2015:131-135).

En este sentido, se ha encontrado que la deposición de material particulado es de 2 a 16 veces mejor en árboles que en vegetación más baja debido a esta característica (Barima et al., 2014).

B2. Tamaño de las hojas

Se reconoce que la deposición es favorecida entre mayor sea la dimensión de las hojas, debido a la extensión de la superficie de contacto (Simon et al., 2014; Janhäll, 2015); sin embargo, Sæbø et al. (2012) han encontrado que no existe una clara influencia de este factor.

Esto puede deberse a que pueden existir especies con hojas grandes pero con poca densidad, o especies con hojas pequeñas pero abundantes y con estructuras complejas en las que la deposición puede ser mayor, como lo han demostrado Freer-Smith et al. (2005).

B3. Rugosidad, humedad y reactividad en las hojas

En contraste con la textura lisa de las paredes, techos y vías de comunicación presentes en una ciudad, las plantas presentan mayor rugosidad superficial, por lo que la posibilidad de que las partículas sean depositadas se incrementa (Beckett et al., 2000; Sawidis et al., 2012; Janhäll, 2015). Al respecto, Guha (2008; citado en Burkhardt & Pariyar, 2014) ha encontrado que la deposición de las partículas finas está extremadamente ligada a la microrugosidad de la superficie de contacto (Figura 1.12).



Figura 1.12. Partículas capturadas en la superficie rugosa adaxial de *Quercus variabilis*. Mo et al. (2015).

*El círculo verde señala partículas depositadas en la superficie rugosa de la hoja.

Por otra parte, las partículas suelen tener mayor facilidad para impactar superficies húmedas o eléctricamente cargadas, debido a la afinidad biológica o química que presenten las hojas respecto a las partículas (Tiwary & Colls, 2010: 300).

Aunado a esto, Rodríguez et al. (2014) hallaron una mayor acumulación de material particulado en la cercanía de las nervaduras de las hojas (cuando existen), esto posiblemente por el arrastre de partículas durante la lluvia.

B4. Pilosidad de las hojas

Además de la extensión y rugosidad de la superficie de contacto, otra característica importante es la presencia de pilosidades (*hairiness*), que a mayor tamaño y densidad posibilitan la captura y evitan la resuspensión de material particulado (Barima et al., 2014; Janhäll, 2015; Sæbø et al., 2012).

Sawidis et al. (2012) han encontrado que los estomas son protegidos significativamente cuando existen pilosidades en la hoja que capturan estos contaminantes (Figura 1.13).

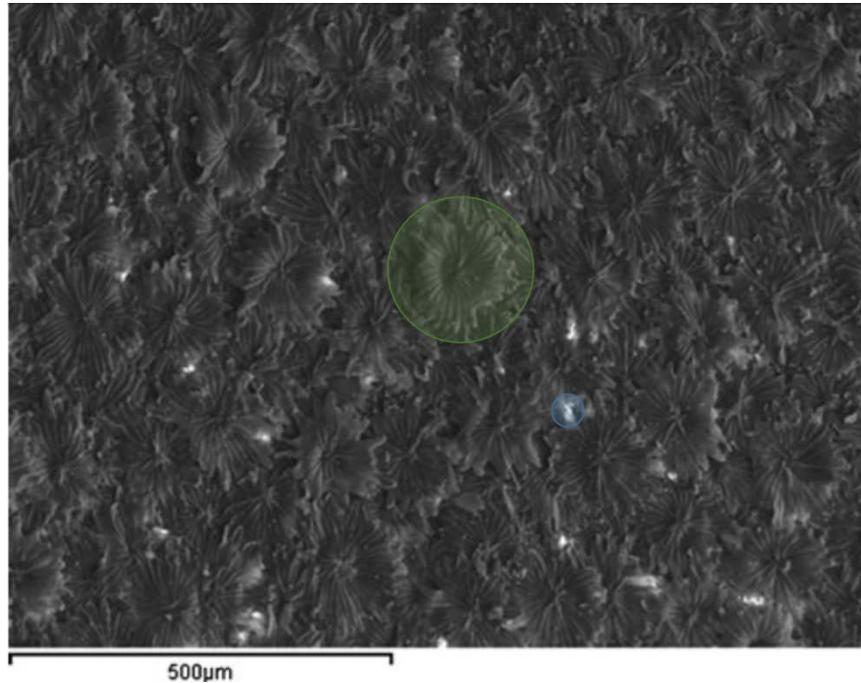


Figura 1.13. Tricomas protegiendo los estomas de material particulado en la superficie abaxial de *Olea europaea*. Sawidis et al. (2012).

*El círculo verde señala uno de los tricomas en forma de estrella. El círculo azul muestra una de las partículas capturadas por los tricomas.

B5. Cutícula cerosa

Las hojas con cutículas gruesas o pegajosas favorecen la deposición y captura de partículas (Beckett et al., 1998; Sæbø et al., 2012; Sawidis et al., 2012; Barima et al., 2014; Janhäll, 2015).

En este sentido, las partículas encapsuladas en esta capa pueden llegar a formar parte del tejido interno de la hoja (Hofman et al., 2014), hecho que se ha comprobado en partículas menores a 10 μm (Terzaghi et al., 2013; citado en Janhäll, 2015). No obstante, cuando ocurre la descamación de la cutícula en algunas temporadas, el material particulado puede ser resuspendido al ambiente (Przybysz et al., 2014).

B6. Presencia de follaje (*perennifolias/caducifolias*)

La presencia de follaje durante el año, la forma de las hojas y la estructura que adoptan las diferentes especies de árboles está relacionada con algunas condiciones respecto a la captura de partículas.

En este contexto, Beckett et al. (1998) reconocen que las especies de hoja ancha son generalmente más resistentes a los contaminantes en comparación con las coníferas, esto porque la mayoría son caducifolias y renuevan constantemente sus hojas. No obstante, los contaminantes pueden ser transferidos al suelo y dañar el sistema de raíces.

Por otra parte, las especies de coníferas suelen ser mejores en la deposición de partículas, ya que poseen una arquitectura más compleja (Freer-Smith et al., 2004) y una disposición tortuosa de las hojas. Aunado a esto, generalmente estos árboles son perennifolios, lo que asegura una superficie de contacto permanente en la que las partículas pueden depositarse durante todo el año (Beckett et al., 1998; Freer-Smith et al., 2005; Przybysz et al., 2014).

Se ha comprobado también que las coníferas mejoran la impactación y retención de material particulado (Grantz et al., 2003); sin embargo, el daño fisiológico puede ser más severo (Beckett et al., 1998), por lo que pueden ser menos tolerantes y poco recomendables en avenidas con elevado tránsito vehicular (Dzierżanowski et al., 2011). Por esta razón, Sæbø et al. (2012) recomiendan el uso de coníferas distinto a una línea frontal, de modo que las especies poco tolerantes no queden totalmente expuestas.

Otra superficie de contacto en la que las partículas pueden depositarse es en la corteza, estructura en la que pueden ingresar o ser retenidas en la superficie. El proceso de ingreso aún no es totalmente comprendido, pero se estima que una posible causa podría deberse a la entrada de partículas durante el periodo de endurecimiento del súber (tejido protector de células muertas en la corteza) o a través de las lenticelas (Catinon et al., 2011).

C. Condiciones meteorológicas

C1. Precipitación

En general se reconoce que las partículas pueden ser removidas del follaje durante la precipitación, sobre todo en aquellas mayores a 10 μm (Dzierzanowski, 2011).

Al respecto, Przybysz et al. (2014) realizaron la simulación de una lluvia de 20 mm en brotes de pino, en la que comprobaron la influencia de este factor en la remoción de material particulado. Las partículas de 10-100 μm fueron removidas un 33-42%; la fracción gruesa en un 25-36%, mientras que la fina un 21-30%.

No obstante, aunque una gran parte de trabajos demuestran una influencia de la lluvia en la remoción de partículas en las hojas, existen estudios como el realizado por Freer-Smith et al. (2005), en los que no encontraron cambios significativos en las partículas gruesas y finas depositadas antes y después de una precipitación.

Estos casos pueden explicarse debido a que la dirección de la lluvia suele impactar principalmente la superficie anterior (adaxial), mientras que la deposición en las hojas de los árboles puede ocurrir también en la superficie posterior (abaxial) de la hoja.

C2. Viento

La velocidad del viento es otro factor que al aumentar su intensidad favorece la deposición de las partículas y la eficiencia de su colecta por parte de las hojas y peciolo (Freer-Smith et al., 2004; Tiwary & Colls, 2010).

Janhäll (2014) menciona que esto sólo ocurre en la fracción gruesa, ya que en las partículas ultrafinas (UFP) sucede lo contrario, mientras que Dzierzanowski et al. (2011) hallaron que las partículas entre 10-100 μm también pueden ser resuspendidas por la acción del viento.

Además, para el caso de tallos y ramas pequeñas, las velocidades de viento muy altas suelen disminuir la eficiencia de impactación y favorecer el rebote de partículas (Tiwary & Colls, 2010: 301). En este sentido, Beckett et al. (2000) han encontrado que el rebote de algunas partículas puede ocurrir a velocidades de viento mayores a 10 m s^{-1} .

C3. Humedad

Las superficies de contacto húmedas pueden favorecer la captura de partículas a través de la disminución del rebote y resuspensión, cuando existen condiciones de viento fuertes (Tiwary & Colls, 2010: 301).

Por otra parte, la humedad atmosférica tiene efectos en el crecimiento de las partículas higroscópicas y en la coalescencia de algunas sales deliquescentes (que absorben la humedad del aire y se disuelven en ella). En este último punto, Burkhardt & Pariyar (2014), han encontrado que a valores de 70-80% de humedad relativa algunas sales deliquescentes se disuelven y degradan las cutículas cerosas, lo que les permite ingresar a los tejidos de la planta (Figura 1.14).

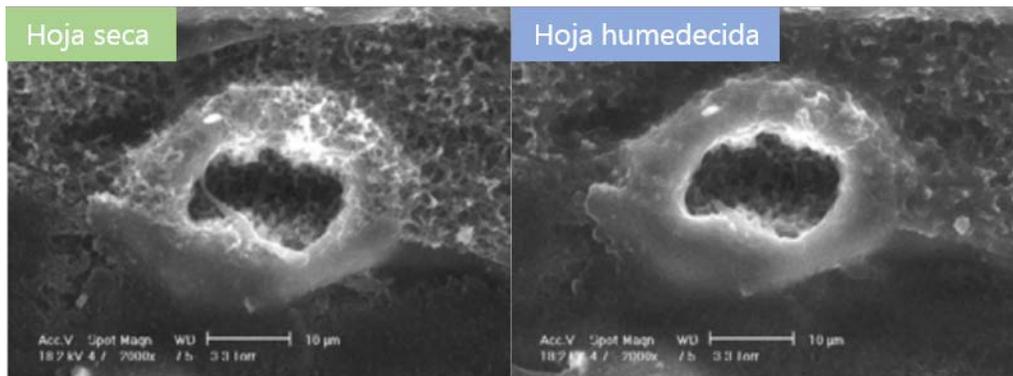


Figura 1.14. Degradación de la cutícula en hojas de *Pinus silvestris* por efecto de deliquesencia de partículas de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Burkhardt & Pariyar (2014).

*La cutícula de la hoja fue degradada al ser rociada con una solución de agua con partículas disueltas de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (diámetro medio de $0.5 \mu\text{m}$).

Por el contrario, cuando la humedad del aire es baja y existe poca disponibilidad de agua en el suelo, los estomas se abren, por lo que se puede favorecer la captura de partículas a través de la superficie de la hoja (Rodríguez et al., 2014).

1.4 ÁREAS VERDES Y MATERIAL PARTICULADO EN EL MUNICIPIO DE TOLUCA

El municipio de Toluca se localiza en la región centro del Estado de México, entre las coordenadas geográficas extremas 18°59'02" y 19°27'09" de latitud norte, y 99°31'43" y el 99°46'59" latitud oeste. Posee una superficie total de 420.14 km² y una altura promedio de 2,660 m sobre el nivel del mar (IGECEM, 2014) (Figura 1.15).

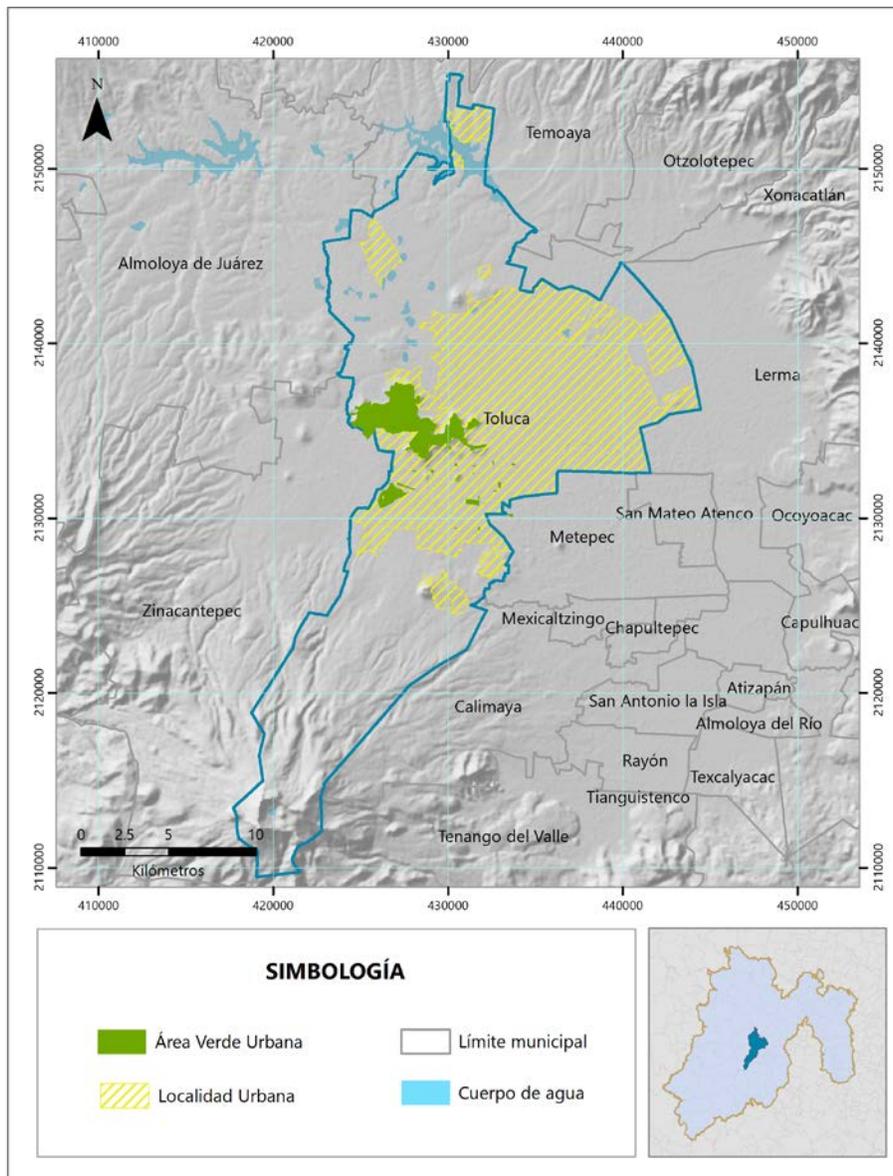


Figura 1.15. Localización del municipio de Toluca, Estado de México. Elaboración propia con base en INEGI (2015a).

1.4.1. Características biofísicas

A. Climatología

El clima del municipio está clasificado como (Cw2) (w) b (i) g, templado sub-húmedo con lluvias en verano y con un porcentaje de precipitación invernal menor al 5%. Las variaciones de temperatura durante el año son de entre 5 y 7°C, con su mes más cálido antes de junio (Adame & Cadena, 2011), mientras que la precipitación media anual varía de 1,000 a 1,200 mm (Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, 2016) (Figura 1.16).

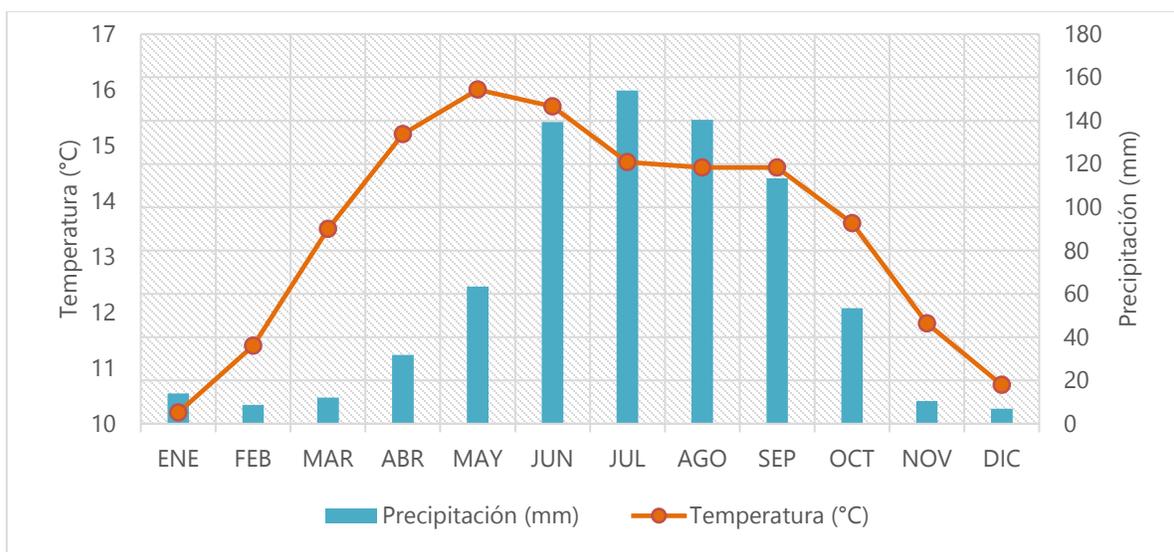


Figura 1.16. Climograma de la estación climatológica Toluca 1951-2010. Elaboración propia con datos de Normales Climatológicas 1951-2010 de la Estación Toluca (DGE). Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2016).

De acuerdo con ProAire (2012), la presencia de estas condiciones en el municipio permite identificar tres épocas meteorológicas:

- Época seca-fría, entre los meses de noviembre y febrero, en la que presenta la temperatura media mensual más baja del año (ProAire, 2012), además de heladas de entre 80 y 140 días (Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México, 2016).
- Época seca-cálida, en los meses de marzo a mayo, en la que se presenta la temperatura media mensual más elevada del año. Se pueden presentar lluvias esporádicas, con valores menores a los 40 mm.
- Época de lluvias, de junio a octubre y con valores de precipitación de 160-210 mm.

En relación con lo anterior, en el municipio de Toluca existen condiciones que favorecen la prevalencia de procesos de deposición seca durante siete meses, lo que permite la captura de partículas por parte de la vegetación urbana y otras superficies. Sin embargo, el grado de afectación en las plantas puede ser elevado durante este periodo ausente de lluvias, al tiempo que la dispersión de contaminantes puede ser más lenta y generar inversiones térmicas.

Por otra parte, también es notable la presencia de condiciones para la deposición húmeda de partículas, que puede ocurrir durante un periodo considerable del año (cinco meses) o en lluvias esporádicas presentes en la época seca. Esta situación puede influir en gran medida en la dinámica del material particulado la atmósfera, haciendo que este contaminante sea depositado, disuelto o removido de las hojas de los árboles.

De acuerdo con Przybysz et al. (2014), quienes hallaron remoción de partículas en una precipitación simulada de 20 mm, en el municipio de Toluca podría presentarse esta condición por acción de lluvia en el mes de abril (pp. media mensual de 31.7 mm), a pesar de no pertenecer a la época húmeda.

En cuanto a la deposición oculta, se presentan condiciones que favorecen este fenómeno muy pocos días al año, durante el periodo de agosto y noviembre (Figura 1.17). Sin embargo, este fenómeno podría presentarse con mayor frecuencia en zonas más elevadas y alejadas de la zona urbanizada dentro del municipio.

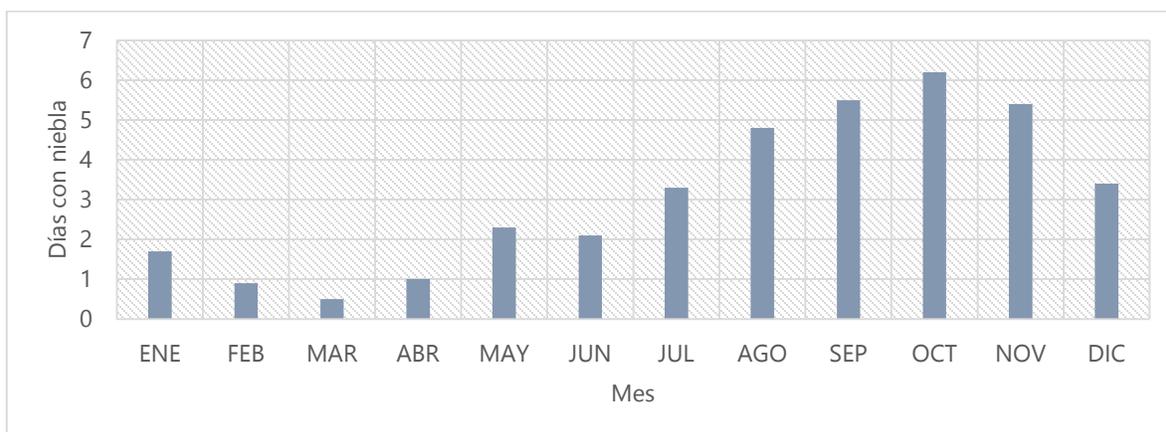


Figura 1.17. Promedio de días con niebla en la Estación Climatológica Toluca 1951-2010. Elaboración propia con datos de Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA, 2016). Normales climatológicas 1951-2010 de la Estación Toluca (DGE).

En lo que concierne a las áreas verdes, debe tomarse en cuenta que más de la mitad del año el municipio no posee lluvias constantes, situación que no permite a las especies con altos requerimientos de agua desarrollarse de manera adecuada, además de requerir de mantenimiento constante, o al menos durante las primeras etapas de crecimiento de la vegetación.

B. Vientos

Respecto a esta variable meteorológica, el municipio forma parte del Valle de Toluca, que se encuentra rodeado por elevaciones montañosas, entre ellas la Sierra Nevado de Toluca al suroeste, la Sierra de las Cruces y la Sierra de Ocoyotepec al este, la Sierra de Monte Alto al noreste y la Sierra Matlazinca al sur. Estas elevaciones determinan fuertemente la dirección de los vientos, en las que el Xinantécatl o Nevado de Toluca influye en el viento proveniente del sur, mientras que la Sierra de Monte Alto y la Sierra de las Cruces obstruyen los vientos alisios que llegan al valle (ProAire, 2012: 25).

En este sentido, los vientos predominantes en el Valle de Toluca, y por tanto en el municipio, provienen del sur en invierno y del sureste en verano (Figura 1.18), lo que puede transportar material particulado de otros municipios cercanos, debido a que el desplazamiento de contaminantes no respeta límites políticos. Lo anterior puede ocurrir sobre todo en la fracción fina y ultrafina de material particulado, debido a que su peso y velocidad de deposición es menor en comparación con partículas de mayor tamaño.

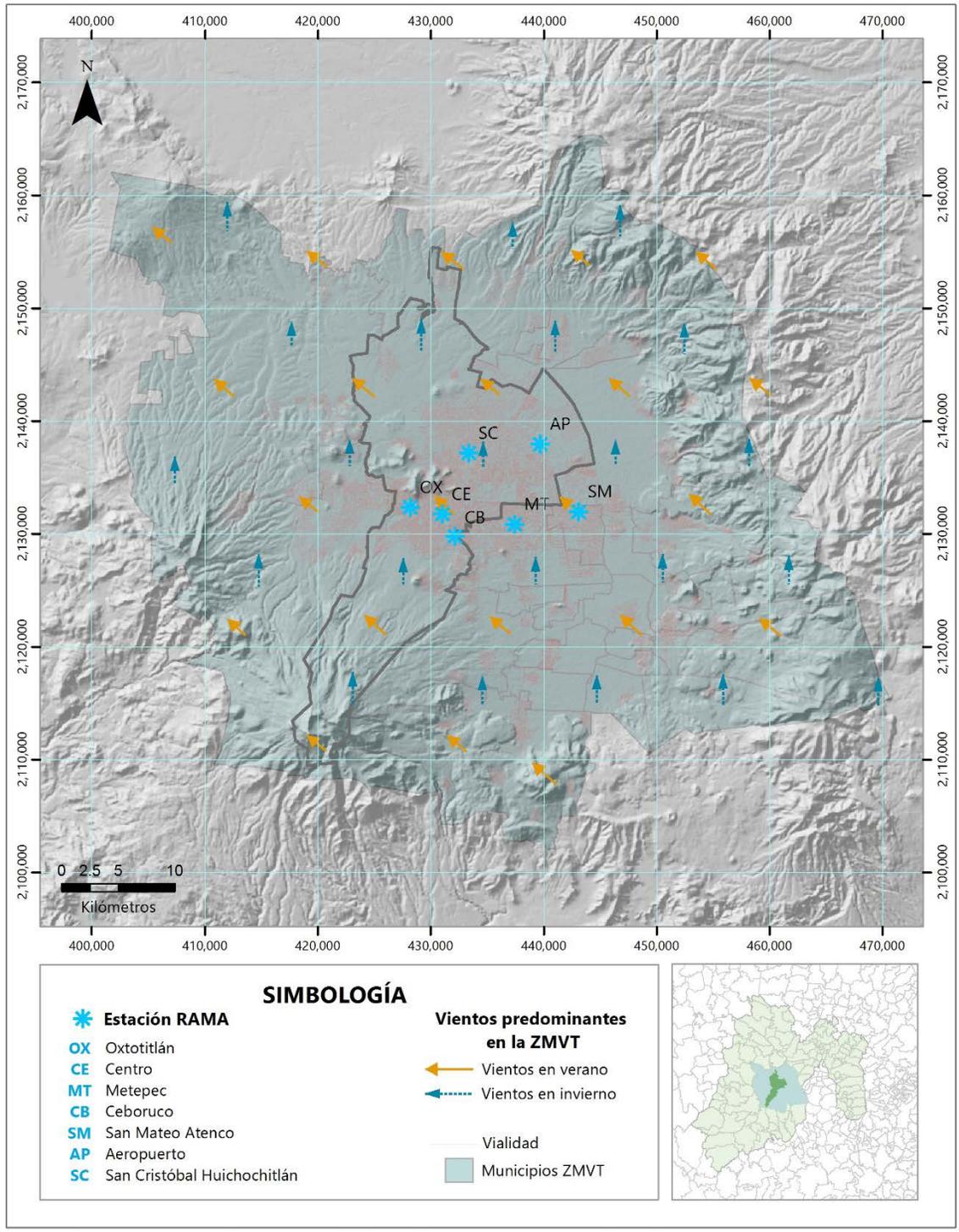


Figura 1.18. Vientos predominantes de la ZMVT. Elaboración propia con base en Inventario de emisiones de la ZMVT (Secretaría del Medio Ambiente GEM, 2007) e INEGI (2015a).

C. Tipos de suelo

En lo que concierne a los tipos de suelo (Cuadro 1.4), el municipio está constituido en más de la mitad de su territorio por suelos phaeozem, vertisol y andosol; en menor proporción se encuentran arenosol y planosol. El porcentaje restante está constituido por asentamientos humanos en los que probablemente existen cuerpos de agua (1.4%) y antrosolos (10.35%).

Cuadro 1.4. Tipos de suelo presentes en el municipio de Toluca.

Tipo de suelo	Características	Superficie en el municipio (%)
Phaeozem	<ul style="list-style-type: none"> - Ricos en materia orgánica. - Húmedos, aunque con periodos en los que el suelo se seca. - Porosos y fértiles. - Erosión eólica e hídrica son peligros para este suelo. 	49.39%
Vertisol	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil manejo de agua. - Poco recomendable para especies con sistema radicular extendido, ya que las raíces se dañan con la expansión-contracción de suelo. - Suelo extremoso entre estrés hídrico y exceso de agua. 	19.79%
Andosol	<ul style="list-style-type: none"> - Buenas propiedades de enraizamiento y almacenamiento de agua. - Fuerte fijación de fosfato causada por Al y Fe libres puede ser un problema. 	13.37%
Arenosol	<ul style="list-style-type: none"> - Alta permeabilidad y baja capacidad para almacenar agua y nutrientes. - Facilidad de enraizamiento. - Alta sensibilidad a la erosión. 	3.65%
Planosol	<ul style="list-style-type: none"> - Lentamente permeables. - Difícil desarrollo de raíces debido a la deficiencia de oxígeno en periodos húmedos, subsuelo denso y/o niveles tóxicos de Al en la zona de raíces. - Requiere fertilizante para buenos rendimientos. - Especies de árboles y arbustos deben tener un sistema de raíces somero y soportar anegamiento temporal. 	2.04%

FUENTE: Elaboración propia con base en IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007) e información del Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1:250000 Serie II INEGI (2007).

La presencia de phaeozem y arenosol, vulnerables a la erosión, y que además se encuentran en gran parte desprovistos de vegetación, posibilita que partículas producto de este fenómeno puedan ser suspendidas en la atmósfera directamente, o desplazadas desde otros municipios aledaños (Figura 1.19). Al respecto, el Inventario de Emisiones de 2004 de la ZMVT (2007) menciona que en el municipio de Toluca existen 35,674 has. susceptibles a la erosión, que aportan en promedio 226.8 ton. de PM₁₀ y 25.0 ton de PM_{2.5} al año.

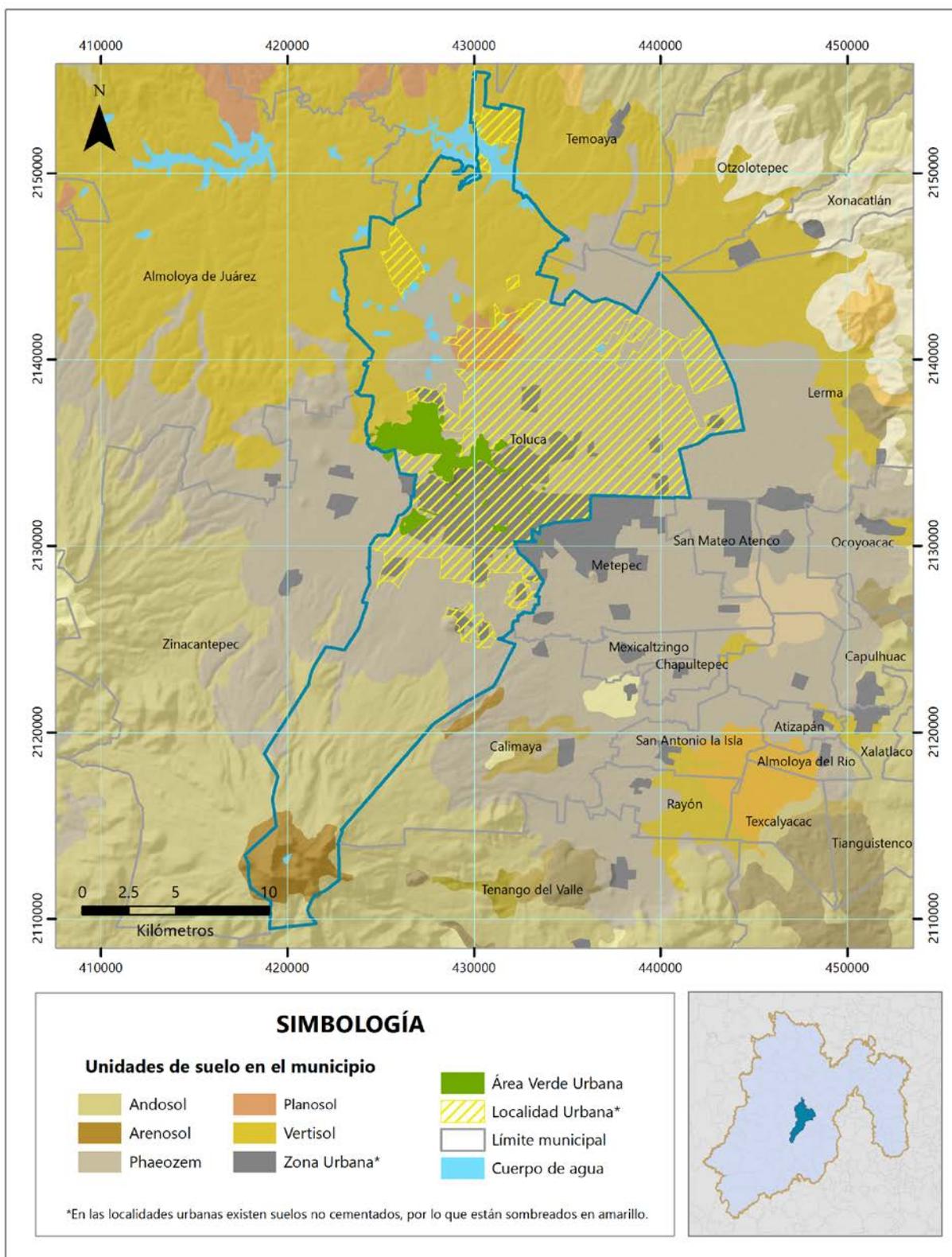


Figura 1.19. Mapa edafológico del municipio de Toluca. Elaboración propia con base en INEGI (2007, 2015a).

Los suelos deben ser también considerados en la tolerancia y adaptabilidad que posean las plantas que conformen las áreas verdes urbanas, debido a que esta capacidad, además de permitir su desarrollo adecuado, permitirá ahorrar recursos invertidos en el riego de estos espacios.

En relación con lo anterior, la presencia de phaeozem y andosol (41.58% del territorio) puede representar una ventaja para el establecimiento de vegetación urbana debido a sus características húmedas y que pueden favorecer su fertilidad, aunque en la realidad en gran parte de los espacios verdes, sobre todo en áreas pequeñas como camellones y arbolado de alineación, se utiliza suelo con mejores condiciones proveniente de otros lugares (conocido popularmente como “tierra negra” o “de monte”) para favorecer el crecimiento inicial de la vegetación. No obstante, conforme las plantas van creciendo, algunas pueden requerir mayor espacio y nutrientes que no son proporcionados por esta capa superficial de suelo introducido, lo que puede afectar su desarrollo.

1.4.2. Características socioeconómicas

El municipio de Toluca está compuesto por la cabecera municipal Toluca de Lerdo y 78 localidades, de las cuales 31 son urbanas (INEGI, 2010). Esta situación hace que el aporte de material particulado suspendido tenga un origen variado: por una parte, derivado de las actividades antropogénicas que se suscitan o en el territorio urbanizado, que representa el 37.7% de la superficie total (INEGI, 2015a), y también por el aporte litogénico de superficies dedicadas a la agricultura, terrenos no pavimentados o espacios desprovistos de vegetación presentes en el municipio

A. Población

Otro factor importante en la presencia de partículas atmosféricas es el crecimiento de la población (Figura 1.20), que a pesar de que ha disminuido su tasa de crecimiento anual en el municipio durante los últimos 40 años, sigue teniendo un número considerable de habitantes, lo que a su vez demanda recursos que generan directa o indirectamente emisiones de este contaminante.

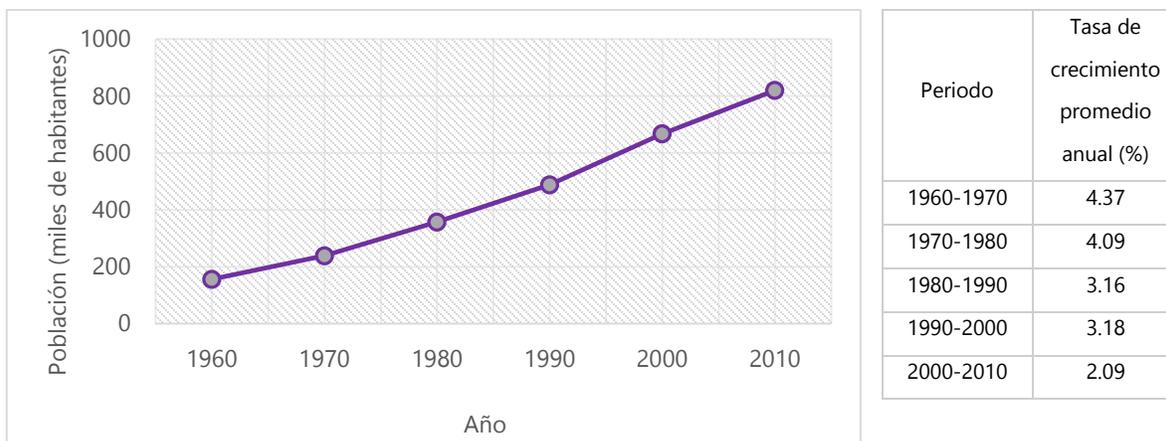


Figura 1.20. Población total en el municipio de Toluca 1960-2010. Elaboración propia con base en Censos de Población y Vivienda INEGI (1960, 1970, 1980, 1990, 2000, 2010).

En relación con lo anterior, los trabajos gubernamentales para la creación, rehabilitación y recuperación de espacios públicos son relativamente recientes, por lo que las áreas verdes no se han incrementado de manera conjunta con el crecimiento poblacional, de modo que satisfagan las necesidades de recreación y esparcimiento de todos los habitantes.

B. Actividades económicas y PEA

Al ser la capital del Estado de México, y por su cercanía con la Ciudad de México, el municipio de Toluca también se ha caracterizado por la presencia de un gran número de establecimientos dedicados a la actividad comercial y los servicios, así como una cantidad considerable de industrias manufactureras (Figura 1.21).

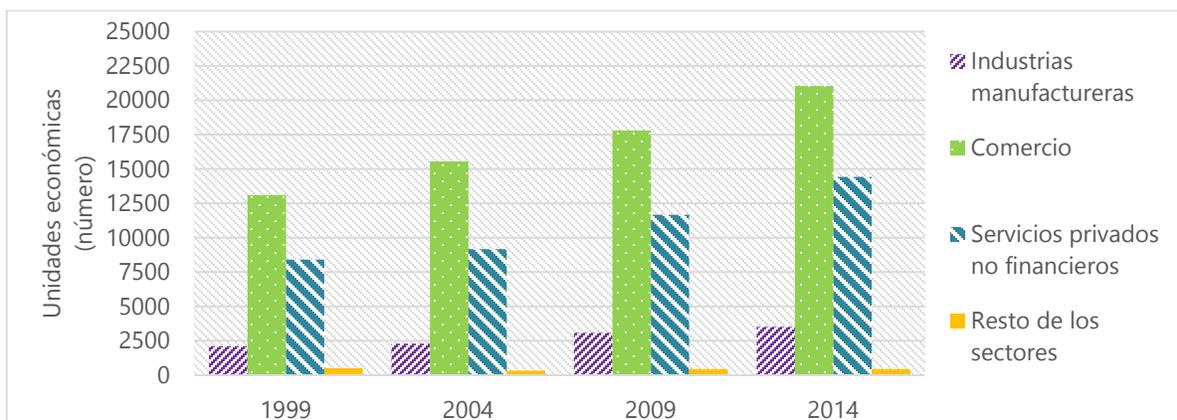


Figura 1.21. Unidades Económicas en el municipio de Toluca (1999-2014). Elaboración propia con base en Censos Económicos INEGI (1999, 2004, 2009, 2014).

Como se puede apreciar en la figura anterior, es notable la tendencia creciente de unidades económicas en el municipio, sobre todo de comercio y servicios, actividades que dependiendo de su naturaleza pueden ser fuentes importantes de material particulado.

Cabe mencionar que a pesar de que la cantidad de industrias manufactureras es menor en comparación a estos dos últimos sectores, las emisiones generadas pueden ser más importantes debido a las dimensiones y modo de producción de este sector.

En relación con los establecimientos registrados se encuentra también la Población Económicamente Activa (PEA), que en 2010 estaba representada por 338,926 habitantes (41.35% de la población total de este año). De éstas, 322,928 se encontraban en Población Ocupada (95.28% de PEA y 39.4% de la población total) (IGECEM, 2014) (Figura 1.22).

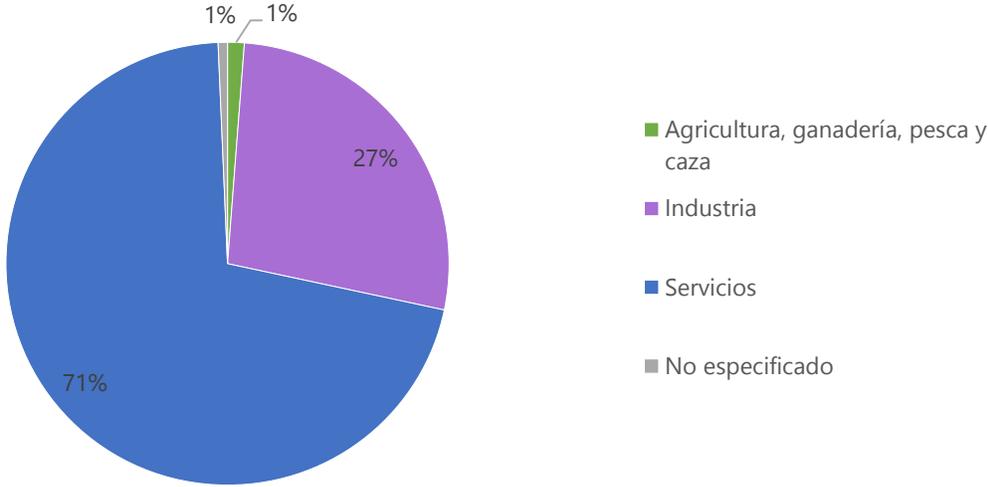


Figura 1.22. Población Ocupada por Sector de Actividad Económica en el municipio de Toluca (2010). IGECEM (2014).

En concordancia con los establecimientos dentro del municipio de Toluca, se puede observar que la mayoría de la Población Ocupada del municipio (98%, y 38.6% de la población total) labora en actividades económicas del sector secundario y terciario.

C. Flota vehicular

El desarrollo de actividades secundarias y terciarias representa a su vez una fuerte demanda de transporte de más de trescientas mil personas (excluyendo las que se transportan caminando o en bicicleta) para desplazarse de sus hogares a los sitios de trabajo.

Además de estos destinos existen desplazamientos hacia los centros educativos, zonas comerciales y de servicios, edificios administrativos, entre otros. En este sentido, la flota vehicular también ha tenido un crecimiento positivo (Figura 1.23).

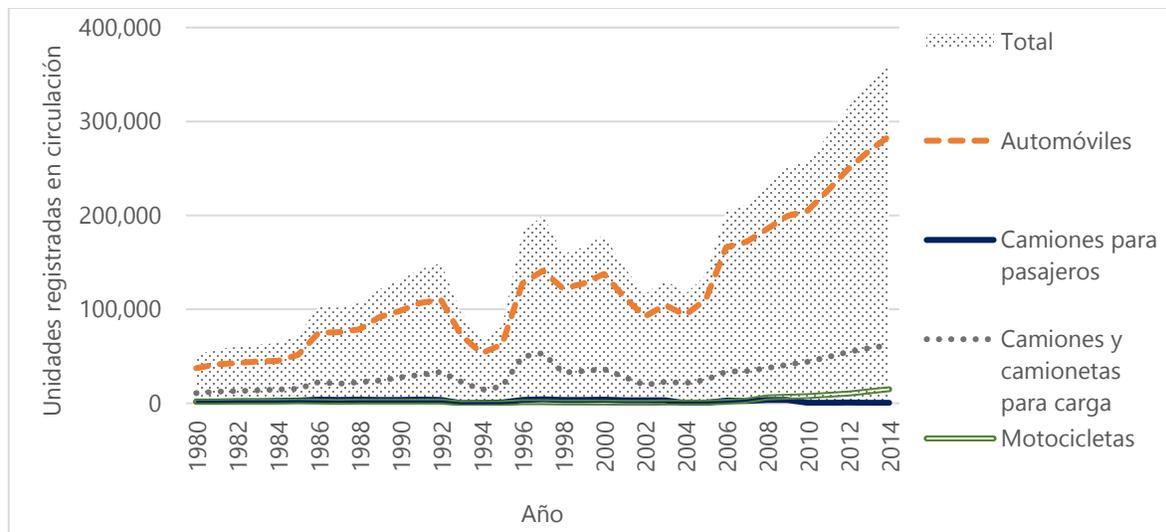


Figura 1.23. Vehículos de motor registrados en circulación en el municipio de Toluca (1980-2014). Elaboración propia con base en INEGI (2016).

El incremento más notable se observa en los automóviles, con una tendencia clara desde 2004; para el caso de camiones y camionetas para carga también existe un incremento desde este año, aunque mucho más moderado. En motocicletas también se observa un ligero incremento después de una flota mantenida hasta 2006, mientras que el número de camiones para pasajeros se mantiene casi constante.

Aunado a esto, deben considerarse los vehículos provenientes de otros municipios que transitan diariamente por el territorio, generando emisiones importantes.

1.4.3. Contaminación por Material Particulado en el municipio de Toluca, México.

El municipio de Toluca forma parte de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), caracterizada por el desarrollo de actividades comerciales, industriales y de servicios que la han posicionado entre las más importantes del país. Empero, la existencia de estas actividades ha generado contaminación por material particulado en el territorio, que se describe a continuación a nivel metropolitano, debido a que no se encontraron registros de este contaminante restringidos a una escala municipal, además de que las partículas no se comportan de acuerdo con los límites políticos establecidos en un territorio.

A. Contaminación por PM₁₀

La presencia de esta fracción de partículas en la ZMVT ha sido atribuida principalmente al desplazamiento de partículas provenientes de áreas agrícolas erosionadas, así como de incendios forestales, calles sin pavimentación, quema de residuos a cielo abierto y emisiones industriales (ProAire, 2012: 48).

En la figura 1.24 se muestran los valores de PM₁₀ reportados por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la ZMVT (RAMA), adaptados al Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA).

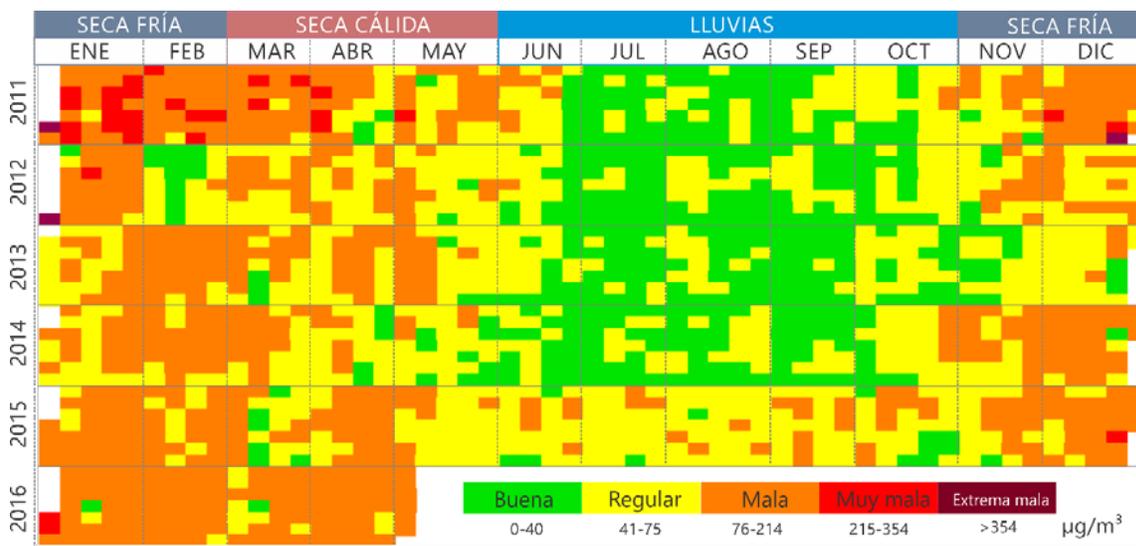


Figura 1.24. Mosaico de la calidad del aire por PM₁₀ en la ZMVT (2011-2016). RAMA (2016b).

Desde 2013 no se ha reportado ningún valor IMECA de condición *extremadamente mala*, aunque sobresale la condición *muy mala* durante la gran parte de la época seca fría y principios de la época cálida; cabe destacar que la incidencia de esta condición se ha reducido a partir de 2012. Las condiciones *regular* y *buena* se presentan casi de manera equitativa, y ambas se presentan durante el periodo de lluvias.

Así mismo, el cuadro 1.5 muestra que se han rebasado los límites máximos permisibles de la media anual de PM₁₀ en todas las estaciones durante los años 2011-2015, a excepción de las estaciones Oxtotitlán y Centro en 2014 y 2015.

Cuadro 1.5. Media diaria y media anual de PM₁₀ registradas en las estaciones de la RAMA-ZMVT 2011-2016.

Año	Oxtotitlán		Centro		Meteppec		Ceboruco		San Mateo		Aeropuerto		San Cristóbal		Promedio ZMVT	
	¹ Día	² Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año
2011	11	69	10	60	17	71	17	69	53	79	58	85	164	123	47	79
2012	0	67	1	51	3	59	4	74	16	85	11	73	66	119	14	75
2013	5	56	0	50	9	56	11	72	42	69	21	71	90	95	25	67
2014	0	52	0	43	0	53	1	55	6	58	12	71	78	81	14	59
2015	0	48	0	46	2	53	0	53	2	55	0	66	21	75	4	56
2016	2	³ NA	1	NA	4	NA	2	NA	10	NA	0	NA	21	NA	6	NA

FUENTE: Elaboración propia con base en datos procesados de la RAMA (2016a).

¹ Día indica el número de días que se superó la media diaria de 120 µg/m³, límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005).

² Año indica el valor de la media anual registrado en la estación. Los recuadros sombreados en color rojo indican los años en que se superó la media anual de 50 µg/m³, límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005).

³ NA=No aplica, debido a que al momento de realizar la investigación no se contaba con información completa para este año.

*El promedio se calculó con el total de días en los que existió registro en las estaciones. Considérese que existen periodos en los que no se registraron datos o fueron erróneos.

La estación San Cristóbal destaca por ser la que ha presentado en general más días que rebasan la NOM-025-SSA-1993, así como tener el valor más alto de media anual. Cabe destacar que el número de días al año en los que se supera la media diaria permisible se ha ido reduciendo progresivamente en esta fracción.

B. Contaminación por PM_{2.5}

Esta fracción ha sido asociada un 68% con las emisiones vehiculares de la ZMVT, donde los vehículos de carga y pasajeros son los emisores principales; también existe un aporte biogénico y litogénico del 17% (ProAire, 2012).

En la figura 1.25 se muestra el mosaico de calidad del aire por PM_{2.5} adaptados al IMECA en la ZMVT.

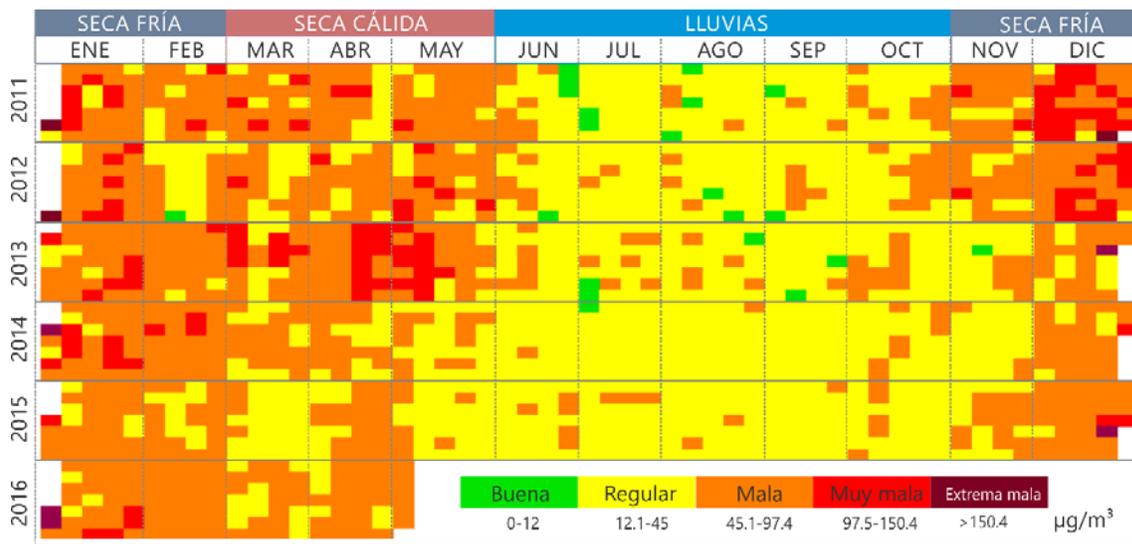


Figura 1.25. Mosaico de la calidad del aire por PM_{2.5} en la ZMVT (2011-2016). RAMA (2016c).

Para esta fracción de partículas se ha presentado la condición *extremadamente mala* a mediados del mes de diciembre y principios de enero; mientras que la condición *muy mala* se ha presentado desde principios de enero hasta la primera quincena de mayo, aunque de manera no muy consistente; esta situación ha disminuido considerablemente desde 2014. La condición *mala* se presenta durante la época seca fría y cálida.

La condición *regular* se presenta aproximadamente durante medio año, y sobresale en el periodo de lluvias. En cuanto a la calidad atmosférica *buena*, se presenta en muy pocas ocasiones, también durante época de lluvias; desde enero de 2014 a mayo de 2016 esta condición sólo se ha presentado una vez.

En este sentido, el cuadro 1.6 muestra que se han rebasado los límites máximos permisibles de la media anual de PM_{2.5} en todas las estaciones durante los años 2011-2015.

Cuadro 1.6. Media diaria y media anual de PM_{2.5} registradas en las estaciones de la RAMA-ZMVT 2011-2016.

Año	Oxtotitlán		Centro		Meteppec		Ceboruco		San Mateo		Aeropuerto		San Cristóbal		Promedio ZMVT	
	¹ Día	² Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año	Día	Año
2011	1	25	1	25	4	30	1	25	5	33	14	39	36	44	9	31
2012	1	27	2	27	2	32	0	24	3	39	12	40	28	50	7	34
2013	13	31	2	27	9	31	1	30	15	33	27	41	32	43	14	34
2014	1	28	1	24	1	30	0	29	2	31	4	35	23	39	5	31
2015	1	28	0	26	3	30	1	31	6	34	2	36	28	42	6	32
2016	2	³ NA	2	NA	3	NA	1	NA	13	NA	0	NA	23	NA	6	NA

FUENTE: Elaboración propia con base en datos procesados de RAMA (2016a).

¹ Día indica el número de días que se superó la media diaria de 65 µg/m³, límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005).

² Año indica el valor de la media anual registrado en la estación. Los recuadros sombreados en color rojo indican los años en que se superó la media anual de 15 µg/m³, límite máximo permisible de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 (DOF, 2005).

³ NA=No aplica, debido a que al momento de realizar la investigación no se contaba con información completa para este año.

*El promedio se calculó con el total de días en los que existió registro en las estaciones. Considérese que existen periodos en los que no se registraron datos o fueron erróneos.

Al igual que en PM₁₀, la estación San Cristóbal destaca por ser la que ha presentado en general más días que rebasan los límites máximos permisibles de la NOM-025-SSA-1993, así como tener junto con la estación Aeropuerto los valores más altos de media anual.

Respecto al número de días al año en los que se supera la media diaria permisible, el valor se ha mantenido constante durante el periodo analizado.

C. Acciones para controlar la contaminación por material particulado en el municipio de Toluca

El municipio de Toluca ha establecido diversas tareas en colaboración con otros niveles de gobierno para el monitoreo y control de emisiones atmosféricas contaminantes, como el establecimiento de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana de Toluca (ahora Zona Metropolitana del Valle de Toluca) que opera desde 1993; y los Programas para Mejorar la Calidad del Aire (ProAire) en sus ediciones 1997-2000, 2007-2011 y 2012-2017.

Aunado a esto, las administraciones municipales recientes han orientado algunas políticas ambientales a la disminución de la contaminación atmosférica, entre las que se incluyen la elaboración del Plan de Acción Climática Municipal (iniciativa y diagnóstico desde 2009, publicación en febrero de 2013), el sistema de bicicletas públicas Huizi (iniciativa en 2014, operación desde noviembre de 2015), y el área de manejo ambiental Ecozona (iniciativa en 2014, operación desde abril de 2016).

Dando continuidad a estos instrumentos, la administración actual (2016-2018) ha enmarcado el Fortalecimiento del Plan de Acción Climática Municipal, y la implementación de la Ecozona dentro de su Plan de Desarrollo Municipal (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016a).

El primero es un instrumento que dirige las políticas públicas, estrategias y acciones en materia de cambio climático a nivel municipal, mediante la formación de capacidades; la identificación de fuentes y estimación de sus emisiones; así como la estimación del grado de vulnerabilidad por sector y las medidas de adaptación (PACMUN, 2013).

No obstante, este programa no reconoce al material particulado como contribuyente específico al cambio climático, a pesar del potencial de algunas partículas, como las del dióxido de azufre y carbono elemental para la retención de calor y con ello generar cambios meteorológicos a escala regional.

El otro programa destacado y contenido en el Plan de Desarrollo Municipal es la Ecozona, área de manejo ambiental de 2.6 km², situada en la zona centro del municipio, y que entre

sus objetivos contempla la implementación de acciones integrales para prevenir y controlar la contaminación.

Para el cumplimiento de este objetivo, el Plan de la Ecozona estableció la línea de acción *Cero Contaminación*, que contempla entre sus acciones la implementación del Programa de Control de Contaminación y Monitoreo Ambiental, que impone infracciones a vehículos y establecimientos que incumplan la normatividad ambiental; la realización de un inventario de establecimientos de prestadores de comercio y servicios fijos y semifijos; así como la expedición de licencias y certificaciones ambientales (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016b).

También el Plan Ecozona incluye en su línea de acción *movilidad sustentable* el sistema de bicicletas públicas *Huizi*, la ruta recreativa dominical Tolo en Bici y el Plan de movilidad no motorizada, acciones que pueden contribuir a mejorar la calidad atmosférica del municipio.

El desarrollo de la Ecozona está planificado con una visión a 2020, año en el que se pretende que las emisiones de GEI hayan disminuido y con ello mejorar la plusvalía de la zona y atraer la inversión privada. Para mayo de 2016, el proyecto se encuentra en la primera etapa, cuya operación comenzó en el mes de abril de 2016. Cabe destacar que en diciembre de este año el proyecto pretende disminuir la generación de contaminantes atmosféricos, principalmente $PM_{2.5}$ (Ecozona Toluca, 2016).

Sin embargo, pese a la importancia y reconocimiento ambiental que tiene la implementación de la Ecozona y el sistema *Huizi*, estos programas cubren solamente el 0.62% del total del territorio municipal, además de concentrarse en la cabecera municipal, siendo que se han detectado los problemas más severos de contaminación por PM_{10} y $PM_{2.5}$ al norte del municipio, como lo han demostrado Romero & Reyes (2009) y los datos de la RAMA presentados previamente en este trabajo.

Esta situación hace que los beneficios de mejora ambiental no sean distribuidos de manera equitativa, por lo que es necesario la implementación de estrategias complementarias con mayor cobertura, así como la coordinación con otros municipios de la Zona Metropolitana para la disminución de este problema.

1.4.4. Estado actual de las áreas verdes en el municipio de Toluca

El municipio de Toluca establece en su Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018 el objetivo de mantener en buen estado las áreas verdes y espacios recreativos naturales a través de la conservación y aprovechamiento de los parques y jardines municipales.

Entre las líneas de acción que tiene para cumplir con esta meta se encuentran la promoción de áreas naturales a proteger, la realización de tareas de mantenimiento como barrido de áreas verdes; poda de setos, árboles y césped; retiro de árboles y maleza; cajeteo de árboles; riego, cultivo y producción de planta de ornato; la colecta de residuos de poda para composta; la reforestación o forestación; la autorización de podas; el mantenimiento a mallas y muros perimetrales de parques y jardines; la construcción de una red de parques de bolsillo; y la modernización y rehabilitación de jardines, plazas y jardines públicos.

Para el cumplimiento de estos objetivos, en el municipio existe la Subdirección de Embellecimiento y Mantenimiento del Espacio Público (SEyMEP), perteneciente a la Dirección de Medio Ambiente.

Esta instancia está encargada de la administración de 19 parques municipales, 5 unidades deportivas, 80 jardines, 111 áreas verdes, 3 paseos, 8 glorietas, 8 plazas, 16 vialidades y 36 camellones; además se encuentran en el municipio de Toluca 1 parque del sistema DIF y 2 parques de jurisdicción estatal (Cuadro 1.7).

En este sentido, las unidades deportivas y las plazas no son consideradas como áreas verdes para esta investigación, debido a que en las unidades deportivas se presenta muy poca vegetación, que en caso de existir, está constituida por campos de pasto que constantemente son erosionados por la práctica deportiva; para el caso de las plazas, están constituidas por macetas y macetones, y no por superficies en contacto directo con el suelo.

En total existen 276 áreas verdes en el municipio de Toluca (mayo, 2016), situación que puede generar dificultades en la administración de estos espacios y su mantenimiento, debido a que la existencia de muchas áreas verdes pero de extensión pequeña genera necesidades de desplazamiento de materiales y personal.

Cuadro 1.7. Áreas Verdes Urbanas del municipio de Toluca (2015)

Área Verde Urbana	Cantidad	Extensión (m ²)
Parques municipales	19	1,764,510
Parque DIF	1	42,640
Parques de jurisdicción estatal ¹	2	1,470,562
Jardines	80	178,536
Áreas verdes ²	111	367,284
Paseos	3	71,800
Glorietas	8	5,342
Vialidades ³	16	2,331,716
Camellones ⁴	36	125,228
Unidades deportivas	5	106,987.51
Plazas	8	32,941
Total ⁵	276	6,357,618

FUENTE: H. Ayuntamiento de Toluca. Subdirección de Embellecimiento y Mantenimiento del Espacio Público (SEyMEP, 2016) (entrevista personal en mayo, 2016).

¹ Referidos a la sección perteneciente al municipio de Toluca del Parque Estatales Alameda Poniente San José de la Pila (Alameda 2000) y el Parque Estatal Sierra Morelos.

² Espacios con vegetación en banquetas, en su mayoría pasto.

³ Espacios con vegetación que se encuentran en vialidades que poseen generalmente circulación en doble sentido, de tres a cuatro carriles.

⁴ Espacios con vegetación que se encuentran en calles o avenidas con circulación de uno o dos carriles.

⁵ No incluye la extensión de unidades deportivas ni plazas.

En conjunto, estos espacios ocupan una extensión de 6,357,618 m² (635.76 has.) lo que representa solamente el 1.5% del territorio municipal. Esta situación posiciona a la ciudad como uno de los territorios urbanos con menos vegetación del centro del país, además de que su distribución no es uniforme, ya que se concentra en la cabecera municipal y en algunos parques delegacionales de pequeña extensión de manera aleatoria.

Existen inconsistencias entre los datos reportados por el H. Ayuntamiento de Toluca respecto a los metros cuadrados de área verde por habitante. Por una parte, el Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018 (H. Ayuntamiento de Toluca, 2016a) menciona que la superficie de áreas verdes por habitante en el municipio es de 4.9 m²/habitante, aunque no menciona explícitamente la metodología para la obtención de esta cifra.

Por otra parte, tomando en cuenta que la población total del municipio es de 819,561 habitantes (INEGI, 2010), y considerando los espacios reportados por la SEyMEP (2016), excepto unidades deportivas y plazas (Cuadro 1.7), la cantidad de metros cuadrados por habitante en el municipio es de 7.75 m², cifra que resulta aparentemente cercana al criterio recomendado por la Organización Mundial de la Salud (8-12 m² por habitante); sin embargo, es sumamente importante resaltar que esta cifra está incluyendo espacios como vialidades, camellones y glorietas, que en la mayoría de las veces solamente incluyen pasto.

Excluyendo unidades deportivas, plazas, vialidades, camellones y glorietas, y tomando en cuenta la población de INEGI (2010), el indicador de espacios verdes por habitante se reduciría significativamente a 4.75 m²/hab., el que se asemeja más al dato reportado por el Plan de Desarrollo Municipal (4.59 m²/hab, H. Ayuntamiento de Toluca, 2016a), inferior al recomendado por la OMS.

Sin embargo, en las recientes administraciones se han propuesto y realizado acciones por parte del H. Ayuntamiento de Toluca para la mejora de las áreas verdes en el municipio, entre las que destaca el programa Ecozona, que incluye entre sus trabajos el mantenimiento y recuperación de espacios públicos, reconociendo a los parques y jardines como un servicio público para reducir las emisiones de GEI. Estas acciones están enmarcadas en dos proyectos principales.

El primero se refiere al Proyecto de Silos de Agua, que consiste en la aplicación de polvo granulado de acrilato de potasio para retener la humedad en el suelo y con ello ahorrar agua destinada para el riego de las áreas verdes. Este programa fue implementado en una fase piloto en el jardín Zaragoza en 2015; y se pretende replicar en todas las áreas verdes de la Ecozona.

El otro proyecto contemplado es el Programa Calle Completa, que aunque su objetivo principal es ofrecer opciones de movilidad para todos los ciudadanos, contempla la inclusión de arborización y jardinería en la calle Sebastián Lerdo de Tejada. Al momento de la redacción de este trabajo (mayo, 2016) el proyecto ejecutivo había sido concluido, aunque no se llevó a cabo operativamente.

Estos proyectos y las demás tareas de mantenimiento y protección de los espacios verdes en el municipio son organizados operativamente por la SEyMEP en 24 cuadrillas, que están

constituidas por 7-10 trabajadores cada una. De estas cuadrillas, 5 están específicamente destinadas para actividades de mantenimiento, retiro y poda; las restantes para jardinería.

Desafortunadamente la mayoría del personal integrante de las cuadrillas no posee certificaciones como arboristas (*International Society of Arboriculture Certified Arborist*), y no recibe capacitaciones constantes para el adecuado manejo del arbolado urbano, por lo que gran parte de su conocimiento está basado en la experiencia, que en ocasiones es nula para el personal recién contratado.

Aunado a esto, no se cuenta con un inventario florístico actualizado de las especies presentes ni con un plan de manejo de áreas verdes (SEyMEP, 2016), en el cual se especifiquen los criterios utilizados para la selección, plantación o mantenimiento de las especies plantadas.

1.5 ANTECEDENTES

En el municipio de Toluca se han desarrollado diversos estudios relacionados con material particulado, principalmente a nivel de su zona metropolitana. Entre los primeros se encuentra el trabajo de Díaz et al. (1999), en el hallaron una concentración media de entre 90 y 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de Partículas Suspensas Totales (PST) con los valores más altos registrados durante los meses de noviembre, diciembre y enero, debido a las bajas temperaturas y la ausencia de lluvia. Además, las concentraciones se mantuvieron casi constantes en el centro de la ciudad, mientras que en los alrededores se incrementaron debido al constante flujo vehicular y la proximidad a la zona industrial.

Posteriormente, Romero et al. (2007) examinaron las PM_{10} depositadas en los filtros de las estaciones de la RAMA, mediante el análisis de su forma y su composición química elemental, hallando partículas de origen cortical, con formas y superficies diversas, compuestas principalmente por Al, Si y O, así como partículas de polen, esporas de hongos, fragmentos de insectos y amebas. En cuanto a partículas antropogénicas, encontraron partículas de formas esféricas y porosas, constituidas por C, S, y en menor grado por Na, Mg, Cl, K, Mn, Ca, Ti, V, Cr, Ni, Cu, Zn, Fe y Ce. Las partículas de Ca, S y O fueron asociadas a materiales de construcción, mientras que las de Fe a la industria metal-mecánica. Además, hallaron que la zona norte de la ZMVT presentaba niveles más altos

de material particulado por la emisión en el sitio y por el transporte de partículas a esta zona.

González (2009) encontró Ca, K, Fe, S, Zn y Cu en las estaciones Centro y Oxtotitlán, y partículas abundantes de C, O, Al y Si, en la estación Centro. En la estación Oxtotitlán se hallaron también partículas de Al, Si, Na, K, de origen primordialmente geológico. En la estación Aeropuerto se encontró un elevado contenido de C, asociado a las actividades industriales, el flujo vehicular y el aerotransporte; también se encontraron partículas de Fe y Zn. Junto con la estación Aeropuerto, en la estación San Cristóbal Huichochitlán se hallaron partículas de origen cortical, con contenido de Si, Al, Na, K, y Ca; el K asociado a la quema por siembra de maíz. También en estas dos estaciones se encontraron partículas de Zn y otros elementos asociados con combustibles de vehículos.

En ese mismo año, Morelos (2009) desarrolló un modelo autorregresivo integrado de media móvil (ARIMA) para el pronóstico de la distribución y tendencia de PM_{10} en el Valle de Toluca. Basándose en datos de 1998-2005 de la RAMA y mediante análisis de series de tiempo, encontró un comportamiento cíclico con una tendencia creciente a rebasar la NOM-025-SSA-1993 en las zonas centro, sur y norte, con un gradiente de concentración que se desplaza hacia la zona norte en la mayoría de los meses del año, y especialmente en invierno. También encontró que la precipitación es el factor meteorológico de mayor influencia en la disminución de la concentración de PM_{10} , por el arrastre de partículas.

Un año más tarde, Gutiérrez et al. (2010) analizaron los bioaerosoles depositados vía húmeda y seca mediante microscopía electrónica de barrido en las estaciones de la RAMA, encontrando microorganismos (hongos, amebas y brocosomas), polen, esporas, fragmentos (restos vegetales, exoesqueletos, residuos de alas de insectos) y diatomeas. En cuanto a su forma, fueron muy diversas, aunque en composición, C y O predominaron como materiales principales; también se encontró Si, Al como elementos complementarios en algunas partículas. Respecto al tamaño, la mayoría de los bioaerosoles hallados se encontraron menores a $5 \mu m$.

Flores et al. (2010) estimaron la exposición de PM_{10} suspendidas en la ZMVT durante el periodo 1998-2005 usando datos de la RAMA. Encontraron una concentración promedio anual de $113.3 \mu g/m^3$, con valores máximos en la estación San Cristóbal (de la RAMA), San Lorenzo Tepetitlán y Toluca Centro; los valores mínimos fueron hallados en la estación

Oxtotitlán, excepto en 1998-1999, donde la estación San Mateo registró los valores más bajos. También estimaron los periodos de retorno, con una variación entre 1.2 a 1.39 años, con magnitudes de entre 160 hasta 460 para un pronóstico a 20 años.

Por su parte, García (2014) realizó una correlación de las PM_{10} monitoreadas en las estaciones de la RAMA con los vehículos particulares registrados en circulación durante el periodo 2006-2011 en la ZMVT, en la que obtuvo un valor general de $r=0.487$ (moderado). Específicamente en las estaciones Oxtotitlán, San Cristóbal Huichochitlán y San Mateo encontró valores de correlación más altos ($r=0.732$, 0.742 , 0.611 , respectivamente), mientras que en las estaciones Centro y Metepec no hubo correlación ($r=0.281$ y 0.292); para el caso de las estaciones Aeropuerto y Ceboruco los valores fueron negativos ($r=-0.021$ y -0.045). Al igual que las investigaciones anteriores, su trabajo también menciona que parte de las partículas del sur son acarreadas a la zona norte del territorio.

En relación a los vehículos, el Centro Mario Molina (2014) propuso la creación de cuatro corredores estructuradores del transporte, y estimó que el reordenamiento de rutas podría reducir en 94% las unidades en circulación, lo que podría a su vez reducir un 90% las emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ originadas por el transporte público sobre estas vialidades.

En lo que respecta al tema de áreas verdes urbanas, en el municipio se han desarrollado diversas investigaciones relacionadas con la descripción, problematización, imagen urbana y características de su uso.

Martínez (1997) realizó una revisión del desarrollo histórico de las áreas verdes en la ciudad de Toluca, así como la descripción de su estado y distribución. En su trabajo menciona la existencia de una cobertura insuficiente y concentrada de áreas verdes en el centro del territorio, debido a la poca proporción y extensión de estos espacios en la periferia.

Años más tarde, Pacheco (2001) analizó los parques Alameda 2000, Matlazincas, Vicente Guerrero y Urawa, presentes en la ciudad de Toluca, desde el punto de vista deportivo y recreativo, en el que utilizó variables como la accesibilidad, infraestructura, vegetación, frecuencia de uso y características de los usuarios. Entre los resultados encontrados destaca la estimación de 11,244 usuarios de las áreas verdes de toda la ciudad (3.32% de la población total de 1995). Además, encontraron que la mayoría de los visitantes que asisten a estos sitios para realizar actividades deportivas pertenecen a la clase media y

alta, y en las primeras horas de la mañana, mientras que en actividades recreativas no halló un patrón. También realizó una propuesta de creación de parque urbano a ubicarse en el Boulevard Alfredo del Mazo entre las calles Río Verdigel y Antiguo camino a San Lorenzo.

Reyes (2010) analizó el arbolado urbano desde el punto de vista de los servicios ambientales, además de hacer una propuesta de plan de manejo para el Parque Alameda 2000, en la que incluye la localización de áreas con cobertura arbórea, la identificación y selección de especies adecuadas y las técnicas básicas para la plantación.

Por su parte, Sánchez (2012) realizó una propuesta de recuperación de terrenos baldíos en la zona interior del circuito Paseo Tollocan para su reconversión a áreas verdes, con la que se incrementarían 16.07 has. (0.1607 km²) en esta zona; además, identificó problemas como la falta de equipamiento y la falta de normatividad específica para estos espacios.

En ese mismo año, Galindo & Victoria (2012) describieron algunos de los beneficios ambientales de las áreas verdes, tomándolas como parte de los elementos para la sustentabilidad urbana en el Valle de Toluca. Mencionan que las problemáticas principales de la vegetación urbana están relacionadas con la falta de espacio (poco ancho de aceras, pavimentación, compactación de suelo) y problemas de jardinería (desmoche, encalado, aporcado, topiaria mal realizada). Para solucionar estos problemas, proponen la realización de un censo, el diagnóstico del estado de las áreas verdes, la reconstrucción de banquetas y el uso de pavimentos flexibles, la selección adecuada de especies por sitio, el cuidado del árbol durante la plantación, entre otras.

Versañez (2014) realizó la identificación de áreas verdes urbanas en 7 municipios de la ZMVT mediante interpretación por fotografías aéreas, imágenes SPOT e información de INEGI a nivel de Área Geoestadística Básica (AGEB). Encontró que la mayoría de estas unidades de análisis (85%) no alcanzan el valor de 9 m² de áreas verdes por habitante, aunque la cobertura es diversa según la AGEB utilizada.

Específicamente en trabajos relacionados con la captura de material particulado en la vegetación urbana, en Colombia se ha estimado que 1379 árboles de cinco especies evaluadas retienen 658 kg/año de PST en la zona cercana al metro de la ciudad de Medellín (Durán & Alzate, 2009).

En España, Dalmasso et al. (1997) determinaron la cantidad de polvo sedimentable en relación con la materia seca foliar de 64 árboles, de 9 especies diferentes, nativas y exóticas, hallando que la *Acacia caven* es la especie más efectiva para la retención de polvo atmosférico.

Przybysz et al. (2014) evaluaron la capacidad de las especies *Taxus baccata*, *Hedera helix* y *Pinus sylvestris* para acumular el material particulado y elementos traza. Tomando en cuenta los efectos de la lluvia y el paso del tiempo en la acumulación. *P. sylvestris* resultó ser la especie con mayor capacidad de retención.

Freer-Smith et al. (2005) analizaron los efectos del tamaño de las partículas en la velocidad de deposición en cinco especies de árboles urbanos en un parque urbano de Londres: *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides*, *Pinus nigra* y *Cupressocyparis leylandii*. Las coníferas resultaron ser mejores especies para la captura en comparación con las especies latifoliadas, debido a las hojas más pequeñas y la presencia de estructuras complejas. *Pinus nigra* y *Cupressocyparis leylandii* resultaron ser mejores en la captura de material particulado, sobre todo en la fracción ultra fina.

Por su parte, Barima et al. (2014) evaluaron la concentración de material particulado en *Amaranthus spinosus* (Amaranthaceae), *Eleusine indica* (Poaceae), *Panicum maximum* (Poaceae) and *Ficus benjamina* (Moraceae) mediante el método de Magnetización Remanente Isotermal de Saturación (MRIS) a diferentes distancias del tramo carretero y en estratos vegetativos diferentes. Los valores de MRIS resultaron al menos cuatro veces mayores cerca de los tramos carreteros que en los parques y áreas residenciales, además que las principales fuentes de generación de material particulado fueron los vehículos motorizados y las industrias. Las especies *A. spinosus* y *F. benjamina* resultaron con mayor MRIS por sus hojas pilosas y cerosas, respectivamente.

En México, se han realizado estudios relacionados con captura de partículas suspendidas en polvo atmosférico en San Luís Potosí, Chihuahua y el Distrito Federal.

Alcalá et al. (2008) evaluaron cinco especies de árboles en la Ciudad de Chihuahua, Chihuahua en muestreos realizados en otoño, primavera y verano respecto a cinco usos de suelo diferentes: comercial y servicios, industria mixta, industria pesada, residencial clase media-alta y residencial popular, empleando el modelo del ProcGLM del SAS. Las especies

que concentraron mayor cantidad de polvo fueron *Cupressus arizonica* (ciprés) con una media de 0.04946-0.005405 g kg⁻¹, y *Platanus occidentalis* (sicomoro) con una media de 0.02554-0.005405 g kg⁻¹. El ciprés capturó más durante la temporada primavera y verano, y en los usos de suelo de comercio y servicios, industria pesada, residencial media-alta y residencial popular; el sicomoro capturó más en otoño, y en el uso de suelo de industria mixta.

Alcalá et al. (2011) investigaron las especies *Prosopis laevigata* (mezquite) y *Schinus molle* (pirul) en un corredor ecológico de 35.5 km en los municipios de San Luís Potosí y Soledad de Graciano Sánchez. Encontraron que el mezquite fue la especie más efectiva para la captura de partículas (0.097-0.010 g kg⁻¹ de materia seca); y que la mayor concentración se localizó en una zona de comercio y servicios.

Por su parte, Escobedo & Chacalo (2008) aplicaron en la Ciudad de México el modelo UFORE (Urban Forest Effects Model) desarrollado por el Departamento de Agricultura y el Servicio Forestal de EUA, para calcular la remoción de O₃ y PM₁₀ por parte de la vegetación urbana como función de la deposición seca y la transpiración. Se obtuvo una descontaminación media de 2,161 toneladas de PM₁₀ (39,314,000 USD por tonelada removida) y de 1,863 toneladas de O₃ (2,450,000 USD) para el año 2000.

A pesar de que la gran mayoría de los trabajos citados anteriormente reconocen la importancia de la vegetación en la disminución de la concentración de contaminantes en la atmósfera, los estudios sobre esta función en la zona de estudio son recientes.

En este sentido, Poblano (2013) utilizó las especies *F. ciliaris* y *L. angustata* (briofitas) como indicadores de contaminación por metales pesados en la ZMVT, en la que observó cantidades más elevadas en *F. ciliaris*. En cuanto a la composición, encontró concentraciones con una tendencia de Fe>Ti>Mn>Zn>Pb>V≈Cu>Cr. También determinó los factores de enriquecimiento, hallando que Cu, Zn y Pb tienen un origen principalmente antropogénico. En cuanto a los sitios, halló mayores concentraciones de metales pesados en Reforma, Alameda y Tollocan (cercano a Plaza Sendero), y durante la época cálida-húmeda. Específicamente en el Parque Fidel Negrete, Santín, Tollocan, Alameda y Reforma encontró metales asociados al tráfico vehicular; en éstos últimos dos lugares halló también Pb, Cr, Cu y Zn, asociados a las industrias cromadora y metal-mecánica.

Dotor (2014) analizó los metales pesados depositados en hojas de *Ligustrum lucidum* en la ZMVT, hallando una concentración mayor durante la época seca-fría y en el orden de Mn>Zn>Cu>Pb. También encontró partículas PM_{2.5} de Al, Ti, Fe, S, Ni, Cr, Zn, Cu, Br, Mn, Nb y Cd, y determinó que los sitios de mayor riesgo para la salud de la población son los industriales, agrícolas y aquellos con alto flujo vehicular. En este sentido, encontró una mayor concentración de Cr y Zn (dañinos a la salud) en el depósito seco de los árboles en Alameda, Casa Blanca y San Pedro (en el municipio de Toluca). Además, determinó factores de enriquecimiento, en el que Cu y Pb alcanzaron valores elevados para los sitios Alameda y San Pedro Totoltepec (alto flujo vehicular e industria). También encontró un valor de bajo riesgo de la población expuesta a partículas por vía inhalatoria.

Por otra parte, Ledesma (2014) analizó los efectos ante el estrés provocado por Mn, Fe, Cu, Zn y Pb en *Ligustrum sp.* y *Juniperus sp.* en la ZMVT durante diciembre 2012 y mayo 2013, hallando inhibición en la respuesta enzimática, disminución en el contenido de proteínas y mayor lipoperoxidación en sitios alto flujo vehicular y actividad industrial. Entre sus resultados destaca que en zonas urbanas el contenido de metales pesados fue mayor, en el orden de Fe>Mn>Zn>Cu>Pb; Fe no fue muestreado en todos los sitios, por lo que en general el Mn fue el metal encontrado en mayores concentraciones, sobre todo en diciembre. Respecto al área foliar, fue estimada en 134.22m² en *Juniperus sp.* y 43m² en *Ligustrum sp.*, siendo el primer género el más favorable en remover partículas por la rugosidad de su superficie foliar y la presencia de resinas en su interior, aunque también resultó el más sensible a los efectos de los contaminantes.

Con base en estos estudios, se pretende dar continuidad a la investigación relacionada con la biorremediación de la contaminación atmosférica efectuada por la vegetación, identificando las especies más adecuadas para la captura de partículas en la superficie de sus hojas.

Lo anterior, pretende otorgar un criterio para la selección de especies a plantar en el ambiente urbano del municipio de Toluca y/o de su Zona Metropolitana.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODO



En la figura 2.1 se muestran las actividades desarrolladas en este trabajo para el cumplimiento de los objetivos planteados.

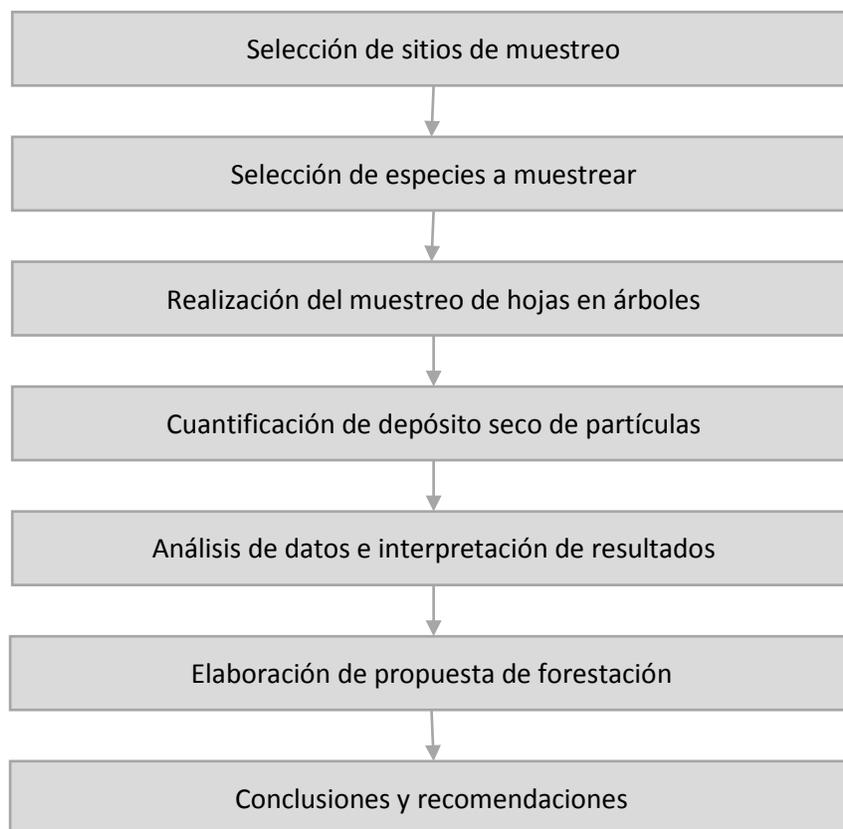


Figura 2.1. Ruta metodológica de la investigación. Elaboración propia.

2.1 Selección de sitios de muestreo

Se realizó una selección previa de los sitios de muestreo, en la que se identificaron zonas con presencia abundante de vegetación mediante el uso del programa Google Earth. Se realizó un recorrido de campo para observar las especies disponibles en cada sitio.

Estas áreas fueron digitalizadas y se exportaron al programa ArcGIS, en el que se contrastaron con capas de información vectorial creadas a partir del Censo Nacional de Población y Vivienda 2010 (INEGI, 2010), el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (INEGI, 2015b), y la Comisaría de Seguridad Vial del H. Ayuntamiento de Toluca (2015), referentes a la ubicación de centros educativos, hospitales y centros de asistencia médica, industrias, establecimientos de comercio y servicios, paraderos de transporte público y avenidas con alto flujo vehicular.

Se calculó la distancia de los sitios pre-seleccionados a los establecimientos antes mencionados, y se realizó la selección definitiva de los sitios de muestreo, considerando que se encontraran a una distancia menor o igual a 100 m, y tomando en cuenta que son puntos fuertes de concentración de población en el municipio. Además, al igual que Barima et al. (2014), se dio preferencia a los espacios verdes que tuvieran más de una especie.

2.2 Selección de especies para el muestreo

La elección de las especies se realizó tomando en cuenta 1) que las especies fueran utilizadas para plantar en ciudades (árboles urbanos) con base en experiencias similares en otros sitios, 2) que se encontraran ampliamente distribuidas en el municipio de Toluca y 3) que estuvieran presentes en la mayoría de los sitios de muestreo, de modo que los datos obtenidos pudieran ser lo más comparables posible.

Además, se procuró elegir especies cuyas hojas y estructura de los árboles favoreciera la captura de material particulado de acuerdo con lo indicado en la literatura.

2.3 Muestreo

Se seleccionaron ejemplares que se encontraran expuestos directamente a vialidades; para el caso de parques y jardines, los que se encontraran en la periferia de estos espacios.

Se registró la especie, su ubicación en coordenadas, y se colectaron aproximadamente 200 g de material foliar (hojas con peciolo) ubicadas en ramas entre los 1.5 y 3 m que presentaran un desarrollo completo y sin patógenos visibles.

Las muestras se guardaron en bolsas de papel y se transportaron a laboratorio para su análisis posterior (Figura 2.2).



Figura 2.2. Colecta de muestras para la cuantificación de material particulado depositado. Fotografías propias.

*1 Registro de especie y coordenadas, 2 Colecta de hojas, 3 Ejemplar con ramas entre 1.5-3 m, 4, 5 muestras guardadas en bolsas de papel.

2.4 Cuantificación de material particulado depositado

Para la recuperación del depósito seco en laboratorio se utilizó la técnica modificada de Dotor (2014), que consistió en pesar 50 g de cada muestra de material foliar fresco y colocarlo en un vaso de precipitado con 400 mL de agua destilada dentro de un sonicador marca Branson mod. 2510 durante 15 minutos a temperatura ambiente. Después de este tiempo, se sacaron las hojas del vaso de precipitado con ayuda de una espátula (Figura 2.3).

Este proceso fue realizado en el Laboratorio del Departamento de Farmacia de la Facultad de Química de la UAEMéx.



Figura 2.3. Pesado y sonicado de hojas para la cuantificación de material particulado depositado. Fotografías propias.

*1 Muestras transportadas en bolsas de papel; 2 Pesado de hojas; 3 Adición de agua destilada; 4 Sonicado de muestras; 5 Agua de lavado posterior al sonicado.

Las muestras en vasos de precipitado fueron trasladadas a la Unidad de Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Facultad de Planeación Urbana y Regional UAEMéx, lugar donde se realizaron los pasos posteriores para obtener el depósito seco.

Cada muestra fue trasvasada por transferencia cuantitativa a tubos vacíos de plástico de 50 mL, los cuales se centrifugaron a 3000 rpm durante 15 minutos en una centrífuga Eppendorf mod.5804 con rotor flotante mod. A-4-44 las veces que fuera necesario hasta completar la muestra y obtener el centrifugado.

En la última centrifugada, el precipitado fue desprendido utilizando una pipeta Pasteur con agua destilada para su trasvase a tubos de plástico marca Corning de 15 mL, previamente pesados en una balanza analítica Scientech mod.SA120. (Figura 2.4). El agua de lavado fue trasvasada para disminuir la probabilidad de perder la muestra debido a que el número de centrifugadas varió entre 8-10.



Figura 2.4. Traslado y centrifugado de muestras para la cuantificación de material particulado depositado. Fotografías propias.

*1 Pesado de tubos vacíos; 2 Traslado de muestras; 3 Centrifugado; 4 Traslado a tubos Corning; 5 Precipitado obtenido después del último centrifugado.

Cada muestra con el precipitado fue secada en estufa a 65°C durante 48 horas y se dejó enfriar en un desecador por 20 minutos a temperatura ambiente. El tubo con la muestra fue pesado nuevamente en la balanza analítica.

Para obtener la cantidad total de depósito seco de material particulado, se restó el peso inicial del peso final del tubo (Figura 2.5).



Figura 2.5. Secado y pesado de muestras para la cuantificación de material particulado depositado. Fotografías propias.

*1 Secado de muestras en estufa; 2 Enfriamiento de muestras secas en desecador; 3 Muestras con depósito seco; 4 Pesado de muestras secas en balanza analítica.

2.5 Análisis de variables meteorológicas

Se consideró la influencia de la precipitación, velocidad y dirección del viento en los sitios, utilizando datos registrados durante el periodo del 1° de octubre- 1° de diciembre de 2015 en las estaciones meteorológicas de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (RAMA, 2015) y de la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM, 2015).

Se usaron los datos de la estación más cercana a cada sitio de muestreo, tomando en cuenta que se encontraran a una distancia máxima de 2 km lineales, calculada en el programa ArcGIS.

Se determinó el número de días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo en cada sitio, a partir de la fecha en que se registró un valor de $pp \leq 4.5\text{mm}$ en cada estación cercana a los sitios de muestreo.

Del mismo modo, considerando la influencia que puede tener el viento en el transporte y resuspensión de partículas, se determinó el promedio de la velocidad y dirección del viento registrada en las estaciones cercanas a los sitios de muestreo durante 10 días anteriores a la fecha de muestreo.

Se determinó la velocidad del viento promedio procesando los datos de cada hora durante el periodo mencionado, utilizando el programa WRPLOT View 7 (Lakes Environmental). Los promedios de viento fueron agrupados según la escala de Beaufort de la fuerza del viento en superficie. Además, se determinó la dirección del viento, obteniendo el valor de frecuencia de los datos registrados cada hora en las estaciones cercanas a los sitios de muestreo.

2.6 Caracterización de las especies analizadas a considerar en la forestación

Posterior a la obtención de los resultados del depósito seco obtenidos, se realizó un análisis de las características de las especies seleccionadas que deben ser tomadas en cuenta en la forestación del municipio de Toluca, considerando criterios de habitabilidad de los árboles en el ambiente urbano propuestos por Yang et al. (2005).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN



3.1 Selección de sitios de muestreo

Con base en la cercanía a los sitios con grandes concentraciones de población, se seleccionaron 10 sitios de muestreo, que se presentan en la figura 3.1. Su distribución en el municipio de Toluca se presentó en la zona urbana del territorio (Figura 3.2).



Figura 3.1. Sitios de muestreo. Fotografías propias e información obtenida con base en información vectorial modificada de INEGI (2015a, 2015b) y Comisaría de Seguridad Vial del H. Ayuntamiento de Toluca (2015).

*Los íconos representan centros de exposición de la población a material particulado; su presencia indica una cercanía menor o igual a 100 m de los sitios de muestreo. Los recuadros verdes de la esquina superior derecha indican las coordenadas UTM del centro aproximado del sitio de muestreo.

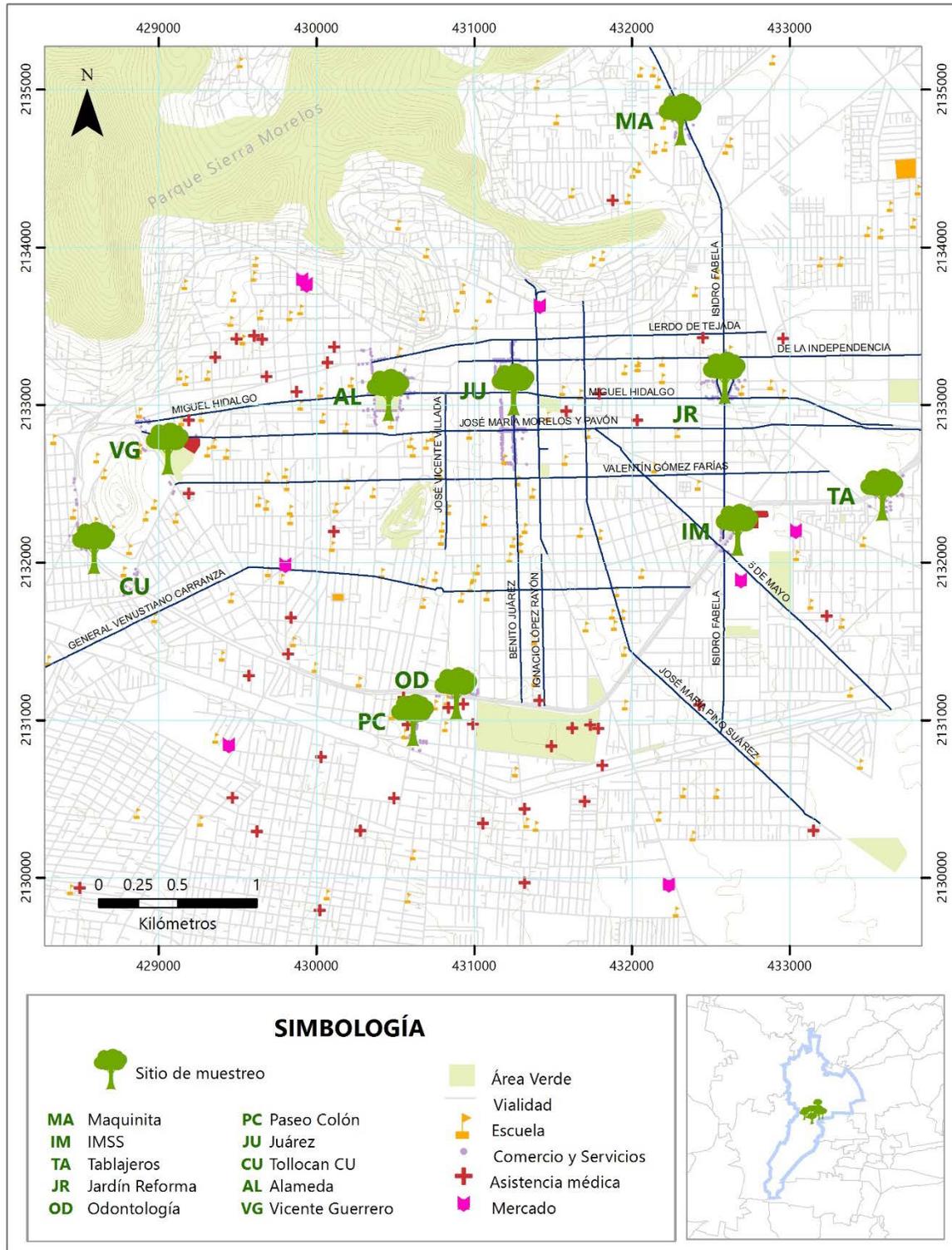


Figura 3.2. Localización de los sitios de muestreo y su cercanía a centros de exposición de la población a material particulado. Elaboración propia con base en información vectorial modificada de INEGI (2015a, 2015b) y Comisaría de Seguridad Vial del H. Ayuntamiento de Toluca (2015).

3.2 Especies seleccionadas

Se eligieron 3 especies de árboles y una familia: *Fraxinus uhdei* (fresno), *Ligustrum lucidum* (trueno), *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar), y Fam. Cupressaceae (cipreses, enebros y tulias) (Figuras 3.3 a 3.5).

La familia Cupressaceae incluye la especie *Cupressus sempervirens* (ciprés mediterráneo), *Juniperus sp.* (enebros) y *Thuja sp.* (tulias); decidió agruparse debido a que no se encontraron suficientes ejemplares de cada especie para su comparación entre sitios de muestreo; además de considerar que la forma y disposición de sus hojas es muy similar (Figura 3.6).

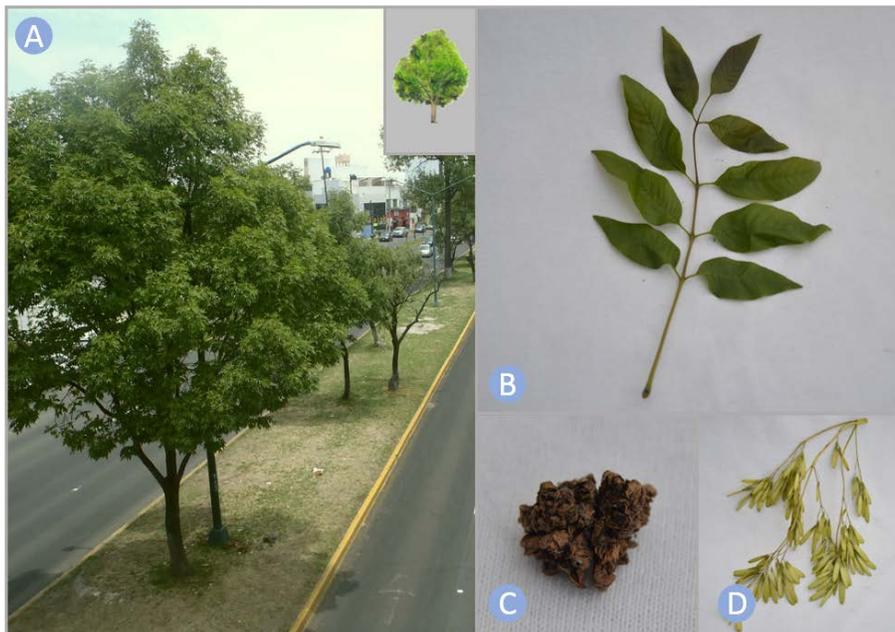


Figura 3.3. Especie seleccionada: *Fraxinus uhdei* (fresno). Fotografías propias e ilustraciones de Vecinos Verdes (2016).

***A** Fresno en sitio de muestreo Tollocan CU, **B** Hoja compuesta con 9 folíolos, **C** Flor verde-café, **D** Fruto (sámara).



Figura 3.4. Especie seleccionada: *Ligustrum lucidum* (trueno). Fotografías propias e ilustraciones de Vecinos Verdes (2016).

*A Trueno en sitio de muestreo Juárez, B Hoja, C Flor blanca-beige, D Fruto inmaduro.

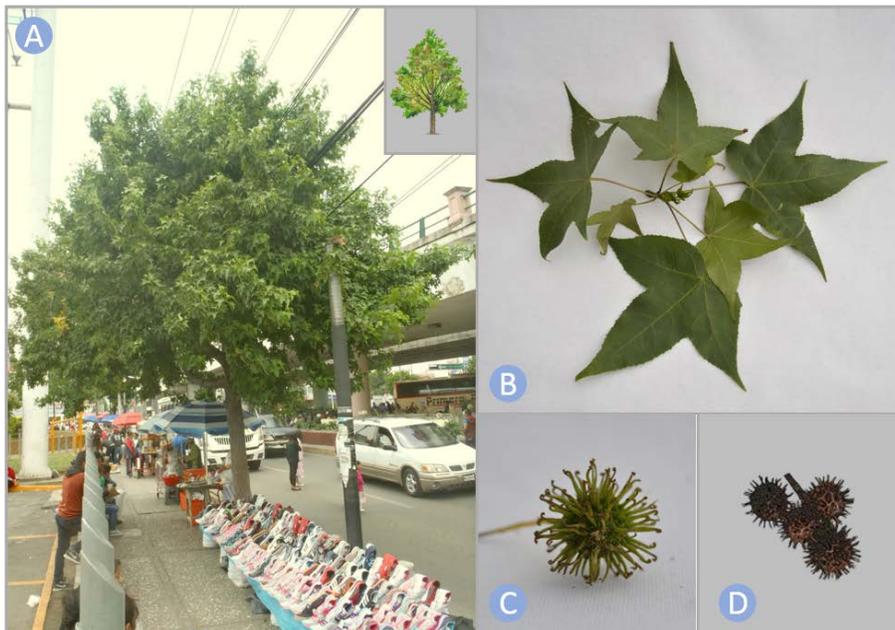


Figura 3.5. Especie seleccionada: *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar). Fotografías propias e ilustraciones de Vecinos Verdes (2016).

*A Liquidámbar en sitio de muestreo IMSS, B Hoja simple no ovalada, C Flor verde-café, D Fruto.



Figura 3.6. Especies seleccionadas: Familia Cupressaceae (cipreses, enebros). Fotografías propias e ilustraciones de Vecinos Verdes (2016).

***A** *C. sempervirens* en sitio de muestreo Maquinita, **B** Hojas escamiformes en diferentes especies de la familia Cupressaceae, **C** Conos globosos de un ejemplar del género *Juniperus*.

3.3 Realización del muestreo

El periodo de muestreo comprendió del 12 de noviembre al 2 de diciembre de 2015, considerado dentro de la época seca-fría de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Se colectaron en total 85 muestras, en promedio 21 ejemplares por especie y 9 por sitio. (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Ejemplares muestreados en el municipio de Toluca, Estado de México.

Sitio	Cupressaceae	<i>L. lucidum</i>	<i>L. styraciflua</i>	<i>F. uhdei</i>	Total
Maquinita	4	3	0	0	8
IMSS	3	0	3	2	8
Tablajeros	3	3	3	3	12
Jardín Reforma	2	4	0	2	8
Juárez	3	3	3	0	9
Odontología	3	3	0	0	6
Paseo Colón	0	0	3	2	5
Tollocan CU	3	0	0	3	6
Alameda	3	3	3	3	12
Vicente Guerrero	3	3	3	3	12
Total	27	22	18	18	85

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

3.4 Depósito seco encontrado por especie

Se muestran a continuación los resultados obtenidos por especie expresados en gramos de depósito seco por kilogramo de material foliar fresco.

3.4.1. Familia Cupressaceae

Se muestrearon 27 ejemplares pertenecientes a la familia Cupressaceae (*Cupressus sempervirens*, *Juniperus sp.* y *Thuja sp.*), hallados en 9 de los 10 sitios seleccionados. La cantidad de depósito seco encontrado en sus hojas se muestra en el cuadro 3.2.

Cuadro 3.2. Depósito seco (g kg⁻¹) en hojas de la familia Cupressaceae en el municipio de Toluca, Estado de México.

Variable	MA	JR	JU	VG	CU	IM	OD	TA	AL
n	5	2	3	3	3	3	3	3	3
Mín	9.198	5.604	3.174	1.442	1.61	14.634	3.472	4.228	1.54
Máx	49.92	21.244	6.618	4.498	10.67	23.224	10.04	6.236	2.438
Prom.	22.3728	13.4240	5.4233	3.1920	4.9200	17.8080	5.8320	5.2880	1.9907
σ	15.8991	11.0591	1.9492	1.5756	4.9986	4.7134	3.6532	1.0086	0.4490
C.V. (%)	71.0648	82.3834	35.9416	49.3621	101.5977	26.4683	62.6408	19.0747	22.5557

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

*MA-Maquinita; JR-Jardín Reforma; JU-Juárez; VG-Vicente Guerrero; CU-Tollocan CU; IM-IMSS; OD-Odontología; TA-Tablajeros; AL-Alameda.

El coeficiente de variación de los resultados de depósito seco encontrados en esta familia de árboles es muy elevado, por lo que el análisis estadístico presentado únicamente es descriptivo.

En este sentido, a pesar de que la acumulación varía en gran medida entre los diferentes sitios de muestreo, se observó que 9 de los 13 árboles muestreados con un depósito mayor a los 10 g kg⁻¹ pertenecen a esta familia (Anexo 1). Además, se encontró que los ejemplares con mayor depósito se localizan en los sitios IMSS y Maquinita, coincidentes con el valor de promedio más alto en esta familia.

Las concentraciones menores a 5 g kg⁻¹ fueron encontradas con mayor frecuencia en ejemplares muestreados en los sitios Alameda, Tollocan CU y Vicente Guerrero.

La acumulación encontrada en esta familia puede asociarse directamente a su superficie de contacto, que otorga amplia porosidad y rugosidad, lo que puede favorecer la captura de material particulado. Además, la disposición de las hojas en diversos ángulos forma una estructura tortuosa que favorece la formación de corrientes turbulentas de aire y ofrece diversas superficies en las que las partículas pueden ser retenidas, incluso después del rebote (Figura 3.7).



Figura 3.7. Partículas depositadas en la superficie de las hojas de Cupressaceae (fam.). Fotografías propias.

***A** Coloración grisácea indica las partículas depositadas, **B** Acercamiento fotográfico de partículas depositadas.

Aunado a esto, la forma columnar/fastigiada y su ramificación desde pocos centímetros del suelo, puede favorecer la captura de contaminantes y la disminución de la exposición de la población desde alturas muy bajas.

Al respecto, Freer-Smith et al. (2005) encontraron una mayor capacidad de las coníferas para capturar cantidades más grandes de partículas en comparación con las de hoja lanceolada analizando *Cupressocyparis leylandii*. Del mismo modo, Alcalá et al. (2008) hallaron entre varias especies de la ciudad de Chihuahua, que *Cupressus arizonica* capturó una mayor cantidad de partículas respecto a *Fraxinus sp.*

3.4.2. *Fraxinus uhdei*

De esta especie se muestrearon en total 18 ejemplares, hallados en 7 de los 10 sitios de muestreo seleccionados. La cantidad de depósito seco encontrado se muestra en el cuadro 3.3.

Cuadro 3.3. Depósito seco (g kg^{-1}) en hojas de *Fraxinus uhdei* (fresno) en el municipio de Toluca, Estado de México.

Variable	JR	TA	AL	VG	CU	IM	PC
n	2	3	3	3	3	2	2
Mín	2.9380	5.7980	1.9300	1.1900	3.7060	8.2160	6.1140
Máx	5.7360	16.3780	2.5360	3.3860	4.6180	14.1680	6.4420
Prom.	4.3370	12.1240	2.1346	1.9460	4.1720	11.1920	6.2780
σ	1.9784	5.5860	0.3475	1.2475	0.4563	4.2086	0.2319
C.V. (%)	45.6187	46.0743	16.2830	64.1107	10.9378	37.6045	3.6943

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

*JR-Jardín Reforma; TA-Tablajeros; AL-Alameda; VG-Vicente Guerrero; CU-Tollocan CU; IM-IMSS; PC-Paseo Colón.

Al igual que en las especies de la familia anterior, el valor del coeficiente de variación en el depósito es muy elevado, por lo que se sólo se realiza una descripción de los resultados.

Como puede observarse en el Anexo 1, Tablajeros e IMSS son los sitios en los que se encontraron valores mayores de depósito seco para esta especie, lo que coincide con los promedios más elevados en estos sitios. Por el contrario, en Vicente Guerrero, Alameda y Tollocan CU todos los ejemplares muestreados de esta especie registraron un valor de depósito seco menor a los 5 g kg^{-1} .

Cabe destacar que exceptuando Tablajeros e IMSS, todos los valores máximos de depósito seco en las hojas de esta especie por sitio no rebasaron los 10 g kg^{-1} . Al respecto, del total de muestras de esta especie, en 10 ejemplares (55.6%) se encontró un depósito seco menor a los 10 g kg^{-1} , en 5 ejemplares (27.8%) un valor entre 5 y 10 g kg^{-1} , y 3 ejemplares (16.7%) con valores superiores a los 10 g kg^{-1} .

Esta especie presenta hojas lanceoladas y ligeramente rugosas, además de algunas pilosidades en los folíolos y en la superficie abaxial, estructuras que pueden favorecer la captura de partículas (Figura 3.8).



Figura 3.8. Partículas depositadas en la superficie de una hoja (foliolo) de *Fraxinus uhdei* (fresno). Fotografías propias.

***A** Se observan algunas partículas sobre la superficie de un foliolo, **B** Pilosidades en la superficie abaxial del foliolo.

En otras especies del mismo género se han encontrado resultados de buena acumulación, como en *Fraxinus chinensis*, que resultó un buen acumulador de partículas frente y detrás de vialidades (Wang et al., 2006), al igual que *Fraxinus pennsylvanica*, con valores altos de depósito encontrado (Popek et al., 2012). Dzierzanowski (2011) encontró en *Fraxinus excelsior* que gran parte de las partículas de la fracción gruesa se depositan dentro de la cutícula de la hoja.

Por otra parte, Gutiérrez (2013) encontró que *Fraxinus uhdei* puede capturar Cu, Mn, Zn, Ni, Al, Fe y Cd, con variaciones estacionales, aunque respecto a *C. aurantium* y *F. benjamina* es la especie que retiene menos contaminantes.

3.4.3. *Ligustrum lucidum*

Se tomaron 22 muestras de árboles de trueno, presentes en 7 de los 10 sitios de muestro seleccionados. El material particulado depositado en hojas de esta especie se presenta en el cuadro 3.4.

Cuadro 3.4. Depósito seco (g kg^{-1}) en hojas de *Ligustrum lucidum* (trueno) en el municipio de Toluca, Estado de México.

Variable	MA	JR	TA	JU	OD	AL	VG
n	3	4	3	3	3	3	3
Mín	3.9520	2.7620	3.9200	7.0720	4.1360	1.6300	1.7980
Máy	7.0720	7.9080	6.7460	8.0680	12.1340	2.5520	2.2960
Prom.	5.9560	4.4805	5.0273	7.4940	7.0220	1.9560	1.9960
σ	1.7392	2.3267	1.5089	0.5151	4.4394	0.5169	0.2642
C.V. (%)	29.2017	51.9306	30.0145	6.8736	63.2214	26.4269	13.2367

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

*MA-Maquinita; JR-Jardín Reforma; TA-Tablajeros; JU-Juárez; OD-Odontología; AL-Alameda; VG-Vicente Guerrero.

El coeficiente de variación total y para cada sitio también fue elevado en esta especie.

En el sitio Juárez se registraron los valores más altos de depósito seco en los ejemplares de esta especie (Anexo 1), lo que coincide con el promedio más alto registrado para estos árboles. Los valores más bajos de depósito seco sobre las hojas de esta especie fueron hallados en los sitios Alameda y Vicente Guerrero.

Cabe destacar que en el 95.5% de los ejemplares muestreados se encontraron valores de depósito seco inferiores a 10 g kg^{-1} ; entre éstos, el 63.6% presentaron menos de 5 g kg^{-1} de partículas depositadas. El único sitio con valores de depósito seco mayor a los 10 g kg^{-1} fue Odontología.

En esta especie, las partículas pueden depositarse en la cercanía de las nervaduras. La presencia de una cutícula cerosa probablemente facilite la remoción de partículas por acción del viento y la precipitación (Figura 3.9). Al respecto, Wang et al. (2015) encontraron que la lluvia puede remover del 28 al 48%, y el viento fuerte del 27 al 36% de partículas depositadas.



Figura 3.9. Partículas depositadas en la superficie de una hoja de *Ligustrum lucidum* (trueno). Fotografías propias.

***A** Se observan algunas partículas depositadas sobre la superficie de una hoja, **B** Acercamiento muestra las partículas depositadas.

También se ha comprobado que esta especie puede ser efectiva en la captura de Mn, Zn, Cu y Pb en la ZMVT (Dotor, 2014).

3.4.4. *Liquidambar styraciflua*

El total de muestras de liquidámbar fue de 18, colectadas en 6 de los 10 sitios de muestreo seleccionados. Los resultados del depósito seco encontrado se muestran en el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5. Depósito seco (g kg^{-1}) en hojas de *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar) en el municipio de Toluca, Estado de México.

Variable	TA	JU	AL	VG	IM	PC
n	3	3	3	3	3	3
Mín	2.1320	3.0520	0.9720	0.9840	2.2440	3.7000
Máx	8.1160	4.3140	4.2780	1.4940	3.8520	7.1420
Prom.	5.2500	3.7307	2.5433	1.2647	3.2767	5.7427
σ	2.9999	0.6364	1.6590	0.2588	0.8962	1.8089
C.V. (%)	57.1418	17.0580	65.2309	20.4675	27.3528	31.4999

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

*TA-Tablajeros; JU-Juárez; AL-Alameda; VG-Vicente Guerrero; IM-IMSS; PC-Paseo Colón.

Los coeficientes de variación también son elevados en estos árboles. Como se observa en el Anexo 1, en los sitios Tablajeros y Paseo Colón se encontraron los valores más altos de depósito seco para esta especie, mientras que en Alameda y Vicente Guerrero se hallaron los de menor depósito.

Es importante mencionar que en todos los ejemplares muestreados los valores de depósito seco sobre las hojas fueron inferiores a los 10 g kg^{-1} , además de que en 18 de 22 ejemplares (81.8%) se encontró un valor de depósito seco inferior a los 5 g kg^{-1} .

Liquidámbar presenta micropilosidades en la superficie adaxial de sus hojas, lo que favorece la captura de partículas (Figura 3.10).

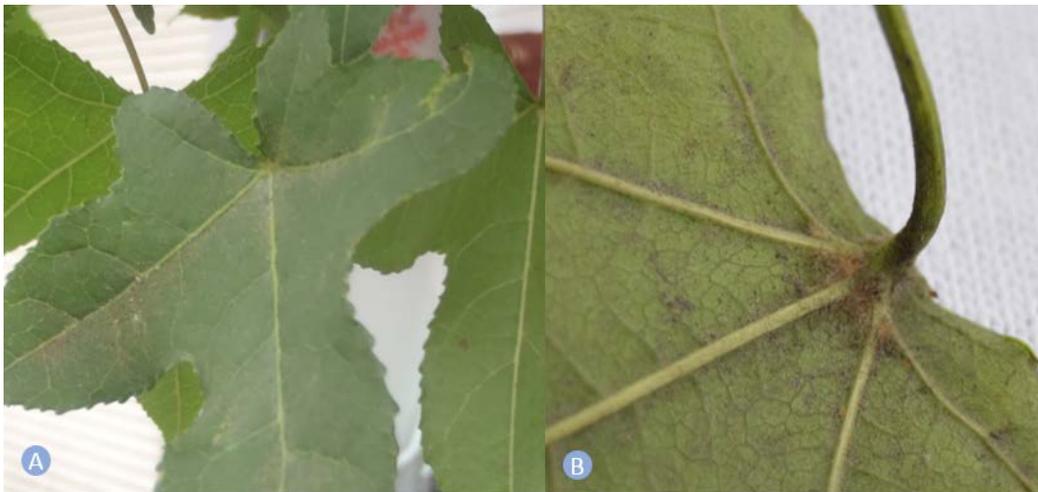


Figura 3.10. Partículas depositadas en la superficie de una hoja de *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar). Fotografías propias.

***A** Se observan algunas partículas depositadas sobre la superficie adaxial de una hoja, **B** Partículas depositadas en la superficie abaxial de la hoja, cerca de las nervaduras y en el peciolo; la captura es favorecida por la rugosidad de la hoja y micropilosidades en la intersección del peciolo con la nervadura.

No se encontraron otros estudios respecto a la depositación de material particulado en la superficie de las hojas de esta especie.

3.4.5. Análisis general de especies

En general, se encontró que en 50 de los 85 ejemplares muestreados (58%) el depósito seco fue inferior a los 5 g kg⁻¹ (Anexo 1). Los resultados del material particulado depositado en los árboles muestreados se presentan en el cuadro 3.6.

Cuadro 3.6. Material particulado depositado (g kg⁻¹) en hojas de Cupressaceae (fam.), *F. uhdei*, *L. lucidum*, y *L. styraciflua* en el municipio de Toluca, Estado de México.

Variable	Cupressaceae (fam.)	<i>Fraxinus uhdei</i>	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Liquidambar styraciflua</i>
n	27	18	22	18
Mín	1.442	1.1900	1.6300	0.9720
Máx	23.224	16.3780	12.1340	8.116
Prom.	8.227925926	5.8191	4.8307	3.6346
σ	6.660445342	4.6243	2.7295	2.0947
Error st.	1.258705857	1.0899	0.5819	0.4937
C.V. (%)	80.94926232	79.4677	56.5031	57.6319

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

Tomando en cuenta los valores promedio, se puede observar que los árboles de la familia Cupressaceae son los que capturaron una mayor cantidad de depósito seco sobre la superficie de sus hojas.

Aunado a esto, como se muestra en el Anexo 1, estos árboles predominan entre los ejemplares en un rango de depósito seco superior a los 10 g kg⁻¹ (69.2%). Para el caso del fresno y el trueno la mayoría (83.33% y 95.45%, respectivamente) de los ejemplares capturaron <10 g kg⁻¹.

Por su parte, en la mayoría de los ejemplares de liquidámbar (77.78%) se encontró un depósito seco inferior a los 5 g kg⁻¹, además que en ninguno de los ejemplares de esta especie se encontró un depósito mayor a los 10 g kg⁻¹.

3.5 Depósito seco encontrado por sitio de muestreo

Se muestran en el cuadro 3.7 los resultados de depósito seco en las hojas de los árboles de las cuatro especies utilizadas en este trabajo agrupadas por sitio de muestreo.

Cuadro 3.7. Depósito seco (g kg^{-1}) en hojas de Cupressaceae (fam.), *F. udhei*, *L. lucidum* y *L. styraciflua* en el municipio de Toluca, Estado de México.

Sitio	N	Mín.	Máx.	Prom.	σ	Error st.	CV (%)
Alameda	12	0.9720	4.2780	2.1562	0.8167	0.2357	37.88
Tollocan CU	6	1.6100	10.6700	4.5460	3.2008	1.3067	70.41
IMSS	8	2.2440	23.2240	10.7048	7.3787	2.6087	68.93
Jardín Reforma	8	2.7620	21.2440	6.6805	6.1383	2.1702	91.88
Juárez	9	3.0520	8.0680	5.5493	1.9447	0.6482	35.04
Maquinita	7	3.9520	20.1020	11.4017	6.1145	2.3111	53.63
Odontología	6	3.4720	12.1340	6.4270	3.6941	1.5081	57.48
Paseo Colón	5	3.7000	7.1420	5.9568	1.3174	0.5891	22.12
Tablajeros	12	2.1320	16.3780	6.9223	4.2140	1.2165	60.88
Vicente Guerrero	12	0.9840	4.4980	2.0997	1.1332	0.3271	53.97

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados del muestreo.

En concordancia con los valores promedio hallados en las diferentes especies, los coeficientes de variación son elevados también en todos los sitios de muestreo, incluso con diferencias más notorias que no permiten identificar claramente los sitios con mayor depósito.

En los sitios Maquinita, IMSS, Tablajeros y Odontología se encontraron concentraciones de depósito seco superiores a los 10 g kg^{-1} (Anexo 1). Entre las características en común que tienen estos lugares se encuentra la alta afluencia vehicular por la presencia de múltiples vialidades, aunada al tránsito lento durante horas pico. Lo anterior, podría sugerir elevadas concentraciones de PM_{10} por desgaste de carreteras, y de $\text{PM}_{2.5}$ derivadas de las emisiones vehiculares (Araujo, 2011; Beckett et al., 1998).

En cuanto a la población expuesta, en estos sitios con valores elevados de depósito seco se encuentran estudiantes de diferentes niveles, principalmente bachillerato. Particularmente en los sitios IMSS y Odontología se puede encontrar personas enfermas y niños que podrían ser más susceptibles a los efectos del material particulado.

Por otra parte, en todos los ejemplares de los sitios Vicente Guerrero y Alameda se encontró un depósito menor a 5 g kg^{-1} (Anexo 1), lo que podría indicar una menor concentración de partículas en estos sitios.

Estos lugares se caracterizan por estar densamente arbolados, además de que en ellos el tránsito vehicular no es tan abundante ni constante en comparación a los otros sitios, sino que sólo en horas pico es cuando existe mayor número de vehículos. La población expuesta en esta zona comprende principalmente estudiantes universitarios, personas que practican actividad física, peatones y conductores de vehículos.

Poblano (2013) y Dotor (2014) han encontrado partículas de metales pesados como Cu, Pb y Zn asociados a fuentes móviles e industrias y con elevados factores de enriquecimiento en el Parque Alameda, lo que plantea la posibilidad de que en este sitio se encuentren cantidades menores de partículas en masa, pero con mayores concentraciones de metales pesados, y con ello, mayor riesgo de daños a la salud.

Utilizando los valores de las estaciones de monitoreo de la RAMA cercanas a los sitios de muestreo (Centro y Oxtotitlán), no se hallaron coincidencias respecto a las concentraciones reportadas, lo que puede explicarse porque la distancia entre estaciones es mucho mayor que la distancia existente entre sitios de muestreo, en la que otros factores meteorológicos y las modificaciones del viento debido a la presencia de infraestructura urbana pueden influir.

Los elevados coeficientes de variación encontrados entre especies y sitios de muestreo pueden ser explicados, además de las condiciones ambientales inherentes, a la ubicación específica de los ejemplares, debido a que la probabilidad de contacto con las partículas puede estar condicionada por la distancia existente entre el ejemplar y la fuente emisora.

Al respecto, existieron ejemplares de la misma especie que dentro de los sitios de muestreo se encontraban a una distancia de hasta 100 m entre sí, debido a que no se hallaron suficientes árboles de una especie a muestrear en los sitios, además de que inicialmente se buscó una distribución homogénea para que los resultados entre especies fueran comparables.

Además, a pesar de que todos los sitios fueron elegidos por el criterio de ser centros importantes de concentración de población y encontrarse cercanos a vialidades altamente

transitadas, desarrollan actividades económicas diferentes, por lo que las emisiones de partículas en cantidad y composición también pueden ser distintas e influenciar el depósito seco encontrado.

Aunado a esto, deben considerarse también las diferencias en el estado de crecimiento de las hojas y su forma de desarrollo, características que podrían influir en la conformación de estructuras que favorezcan la deposición y captura de partículas, como la presencia de pilosidades en hojas jóvenes de algunas especies o la presencia de estructuras más tortuosas en hojas maduras en algunos árboles, por mencionar algunos ejemplos.

En relación con lo anterior, en algunas hojas maduras pudiera encontrarse una mayor cantidad de depósito, debido a que el tiempo de exposición es por lo general mayor en comparación con las hojas jóvenes.

3.6 Influencia de variables meteorológicas

Se utilizaron las estaciones meteorológicas E15, E16 y E57 de la CAEM; y Centro y Oxtotitlán de la RAMA para el análisis de las variables meteorológicas. Su localización respecto a los sitios de muestreo se muestra en la figura 3.11.

Para el tratamiento de estas variables meteorológicas con el depósito seco se utilizó el valor promedio, al considerar que podría ser el más adecuado de entre los valores obtenidos para su comparación. Sin embargo, dada su variabilidad entre los sitios, este dato debe ser tomado con precaución.

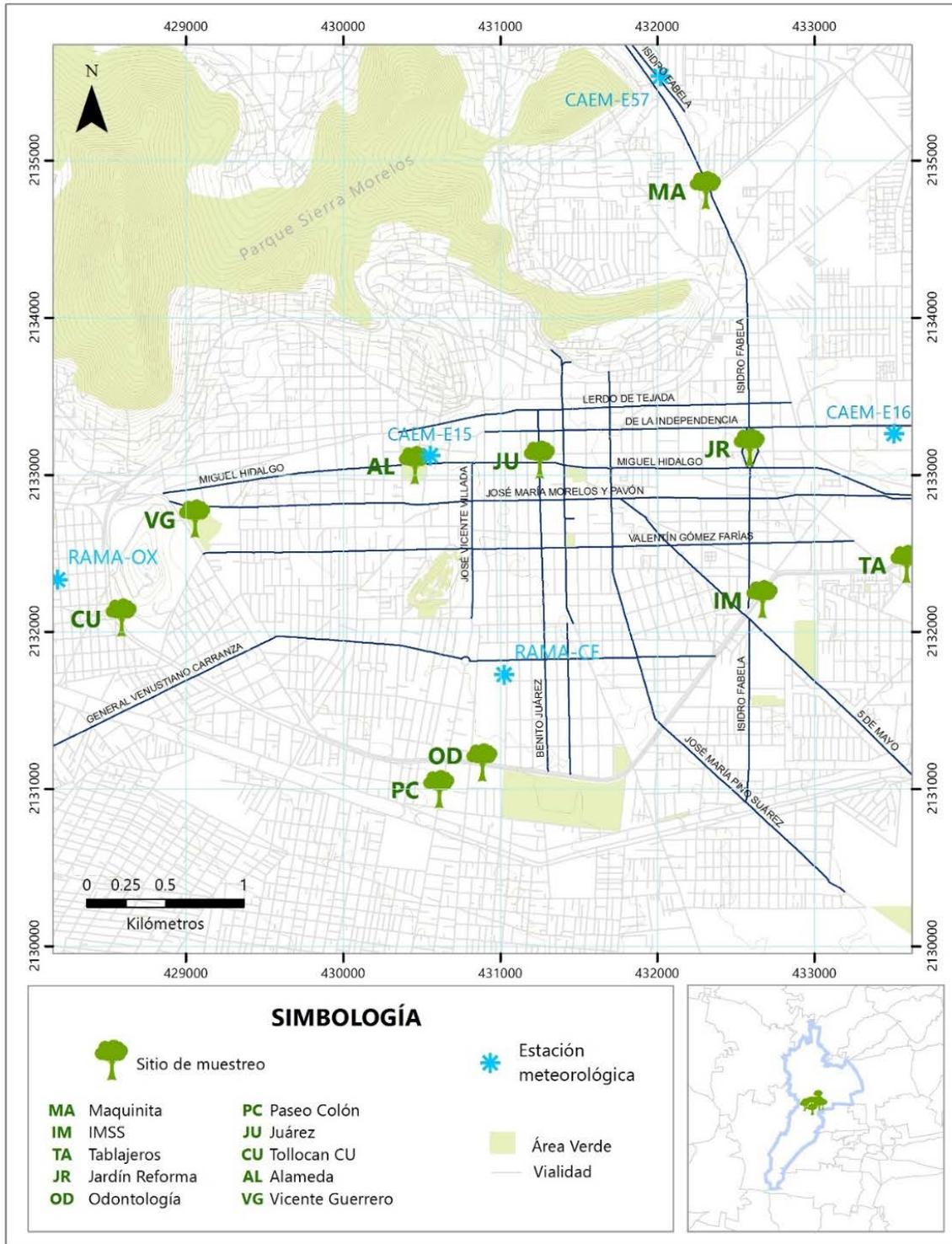


Figura 3.11. Estaciones utilizadas para el análisis de variables meteorológicas en el depósito de material particulado en hojas de árboles en el municipio de Toluca, Estado de México. Elaboración propia con base en RAMA (2015), CAEM (2015) y procesamiento de información vectorial de INEGI (2015a).

3.6.1. Días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo

Se presentan en el cuadro 3.8 el número de días sin lluvia ($pp \leq 4.5$ mm) determinado para cada sitio de muestreo.

Cuadro 3.8. Días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo por cada sitio en el municipio de Toluca.

Sitio de muestreo	Fecha de muestreo	Estación de referencia	Distancia del sitio a la estación (m)	Fecha y valor de la última $pp \geq 4.5$ mm	Días sin lluvia ($pp \leq 4.5$ mm)	Depósito seco promedio ($g\ kg^{-1}$)*
Maquinita	NOV-12	CAEM-E57	794.03	NOV-4; 10.2 mm	7	11.4017 \pm 6.1145
IMSS	DIC-2	RAMA-CE	1571.21	OCT-30; 4.6 mm	32	10.7048 \pm 7.3787
Tablajeros	NOV-22	CAEM-E16	827.58	NOV-4; 8.1 mm	17	6.9223 \pm 4.2140
Jardín Reforma	NOV-19	CAEM-E16	927.98	NOV-4; 8.1 mm	14	6.6805 \pm 6.1383
Odontología	NOV-24	RAMA-CE	579.31	OCT-30; 4.6 mm	24	6.4270 \pm 3.6941
Paseo Colón	DIC-2	RAMA-CE	846.4	OCT-30; 4.6 mm	32	5.9568 \pm 1.3174
Juárez	NOV-24	CAEM-E15	702.43	NOV-4; 6.6 mm	19	5.5433 \pm 1.9447
Tollocan CU	NOV-30	RAMA-OX	297.7	NOV-12; 7.7 mm	17	4.5460 \pm 3.2008
Alameda	NOV-26	CAEM-E15	116.2	NOV-4; 6.6 mm	21	2.1562 \pm 0.8167
Vicente Guerrero	NOV-30	RAMA-OX	993.61	NOV-12; 7.7 mm	17	2.0997 \pm 1.1332

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados de muestreo y análisis de precipitación registrada en estaciones E15, E16 y E57 (CAEM, 2015); CE y OX (RAMA, 2015).

* El \pm presenta la desviación estándar respecto a la media obtenida. Considérese tomar este dato con precaución.

Los días sin lluvia anteriores a la fecha de muestreo oscilaron entre 7 y 32 dependiendo del sitio de muestreo.

Como se puede observar, en el sitio Maquinita el periodo de acumulación de partículas en la superficie de las hojas posterior a la precipitación fue más corto en comparación con los sitios restantes; no obstante, en este lugar se hallaron ejemplares con un depósito seco mayor a los $10\ g\ kg^{-1}$ (lo que coincide con el valor promedio más elevado).

En los sitios Alameda y Vicente Guerrero, que presentaron una mayor cantidad de días sin lluvia que permitieran la acumulación de partículas en las hojas, los valores de depósito seco fueron inferiores a los $5\ g\ kg^{-1}$ en todos los ejemplares.

Dicho lo anterior, para ninguno de los sitios se observó una relación clara entre el número de días sin lluvia y la cantidad de partículas depositadas, lo que se puede observar en sitios con alta cantidad de depósito-pocos días sin lluvia, baja cantidad de depósito-muchos días sin lluvia, o comparando entre sitios en los que se presentara el mismo número de días sin lluvia.

No obstante, lo anterior no representa que no exista una influencia de esta variable en los mecanismos relacionados con la concentración, dispersión y tiempo de residencia de material particulado en la atmósfera. Por el contrario, debe considerarse su importancia en la determinación del tipo de deposición predominante: húmeda, seca u oculta; y en la resuspensión, rebote, deliquescencia, crecimiento higroscópico, y formación de partículas secundarias, procesos descritos en secciones anteriores de este trabajo.

3.6.2. Velocidad y dirección del viento

Se muestran en el cuadro 3.9 los resultados de velocidad y dirección del viento, obtenidos del análisis de las estaciones de la RAMA y la CAEM cercanas a los sitios de muestreo.

Cuadro 3.9. Dirección y velocidad del viento promedio en los diez días anteriores a la fecha de muestreo en el municipio de Toluca, Estado de México.

Sitio	Fecha de muestreo	Estación de referencia	Periodo de análisis viento	Vel. Viento promedio ($m s^{-1}$)	¹ Viento escala Beaufort	Dirección del Viento (barlovento)	² Depósito seco promedio ($g kg^{-1}$)
Maquinita	NOV-12	CAEM-E57	NOV 2-11	3.17	Brisa suave	NW (18.1%) SE (16.4%)	11.4017 ±6.1145
IMSS	DIC-2	RAMA-CE	NOV 22-DIC 1	0.95	Ventolina	W (16.7%) WSW (13.8%)	10.7048 ±7.3787
Tablajeros	NOV-22	CAEM-E16	NOV 12-21	4.11	Brisa leve	E (18.0%) W/NW (10.6%)	6.9223 ±4.2140
Jardín Reforma	NOV-19	CAEM-E16	NOV 9-18	3.68	Brisa leve	E (16.7%) NW (9.9%)	6.6805 ±6.1383
Odontología	NOV-24	RAMA-CE	NOV 14-23	1.04	Ventolina	W (17.3%) WSW (11.9%)	6.4270 ±3.6941
Paseo Colón	DIC-2	RAMA-CE	NOV 22-DIC 1	0.95	Ventolina	W (16.7%) WSW (13.8%)	5.9568 ±1.3174
Juárez	NOV-24	CAEM-E15	NOV 14-23	2.90	Brisa suave	NE (7.6%) NNW (5.7%)	5.5433 ±1.9447
Tollocan CU	NOV-30	RAMA-OX	NOV 20-29	1.40	Ventolina	WNW (15.0%) SE (13.8%)	4.5460 ±3.2008
Alameda	NOV-26	CAEM-E15	NOV 16-25	2.76	Brisa suave	NE (8.1%) ENE (5.9%)	2.1562 ±0.8167
Vicente Guerrero	NOV-30	RAMA-OX	NOV 20-29	1.40	Ventolina	WNW (15.0%) SE (13.8%)	2.0997 ±1.1332

FUENTE: Elaboración propia con base en resultados de muestreo y análisis de dirección y velocidad del viento registradas en estaciones E15, E16 y E57 (CAEM, 2015); CE y OX (RAMA, 2015).

¹ Según la escala de clasificación de vientos de Beaufort, los efectos observables en suelo firme son: en ventolina ($0.3-1.5 m s^{-1}$) la dirección del viento se define por el humo o por veletas; en brisa suave ($1.6-3.3 m s^{-1}$) se mueven las hojas de los árboles; en brisa leve ($3.4-5.4 m s^{-1}$) las hojas y ramas pequeñas se hallan en constante movimiento.

² El \pm presenta la desviación estándar respecto a la media obtenida. Considérese tomar este dato con precaución.

Como se puede observar en la figura 3.12 A y B, las velocidades promedio más altas se presentaron en Tablajeros, Jardín Reforma, Maquinita, Juárez y Alameda, aunque no se rebasaron los 4.2 m s^{-1} (brisa leve en escala de Beaufort) en ninguna estación de referencia de los sitios de muestreo.

En los sitios Maquinita y Tablajeros se encontraron algunos ejemplares con depósito mayor a los 10 g kg^{-1} , lo que plantea la posibilidad de un aporte o resuspensión de partículas en estos sitios, aunque debido a las velocidades bajas del viento, lo más probable es que provengan de fuentes cercanas durante los diez días previos a la fecha de muestreo. Contrariamente, en los sitios Jardín Reforma y Alameda, Poblano (2013) y Dotor (2014), han hallado elevados factores de enriquecimiento, lo que plantea la posibilidad de un aporte de partículas de fuentes más distantes en estos sitios.

Considerando lo anterior, tampoco se encontró una relación directa entre la velocidad del viento y la cantidad de depósito seco hallado en las hojas de los árboles, lo que puede explicarse, además de la variabilidad en los datos del depósito seco, por la influencia de movimientos turbulentos que ocurren con el paso de los vehículos, sobre todo en vialidades de alta velocidad en las que las partículas pueden ser resuspendidas o rebotadas de las hojas. Este fenómeno puede afectar aún más a las hojas ubicadas en la altura de muestreo de este trabajo (1.5-3 m), en las que la captura puede ocurrir a una distancia muy cercana ($\pm 15 \text{ cm}$) de la vialidad, por lo que es necesario identificar factores de enriquecimiento en las partículas y realizar una medición de la velocidad del viento más precisa y cercana a los puntos de muestreo.

Por otra parte, los sitios Maquinita (est. CAEM-57), Tablajeros y Jardín Reforma (est. CAEM-16), Tollocan y Vicente Guerrero (est. RAMA-OX) coincidieron con los vientos históricos registrados para la ZMVT en el verano, lo que no ocurrió en invierno. En los otros sitios no se encontró coincidencia de la dirección del viento respecto a los datos anuales registrados para la ZMVT (Figura 3.13).

Lo anterior puede explicarse debido a que el periodo de vientos reportado por el Inventario de Emisiones de la ZMVT (2007) utiliza datos históricos, a diferencia del periodo de 10 días analizado en este trabajo. Aunado a esto, la presencia de infraestructura urbana puede modificar las velocidades y dirección del viento cuando este pasa a través de diferentes superficies de contacto.

No se encontró una relación directa entre la velocidad y dirección del viento con el depósito seco, sin embargo, esto no representa que estas variables no tengan influencia en la deposición y resuspensión de partículas en la superficie de las hojas; por el contrario, posiblemente estos factores sean la causa de las variaciones en el depósito seco encontrado al interactuar con otras variables meteorológicas que intervienen en la dinámica del material particulado atmosférico y que fueron revisadas en secciones anteriores.

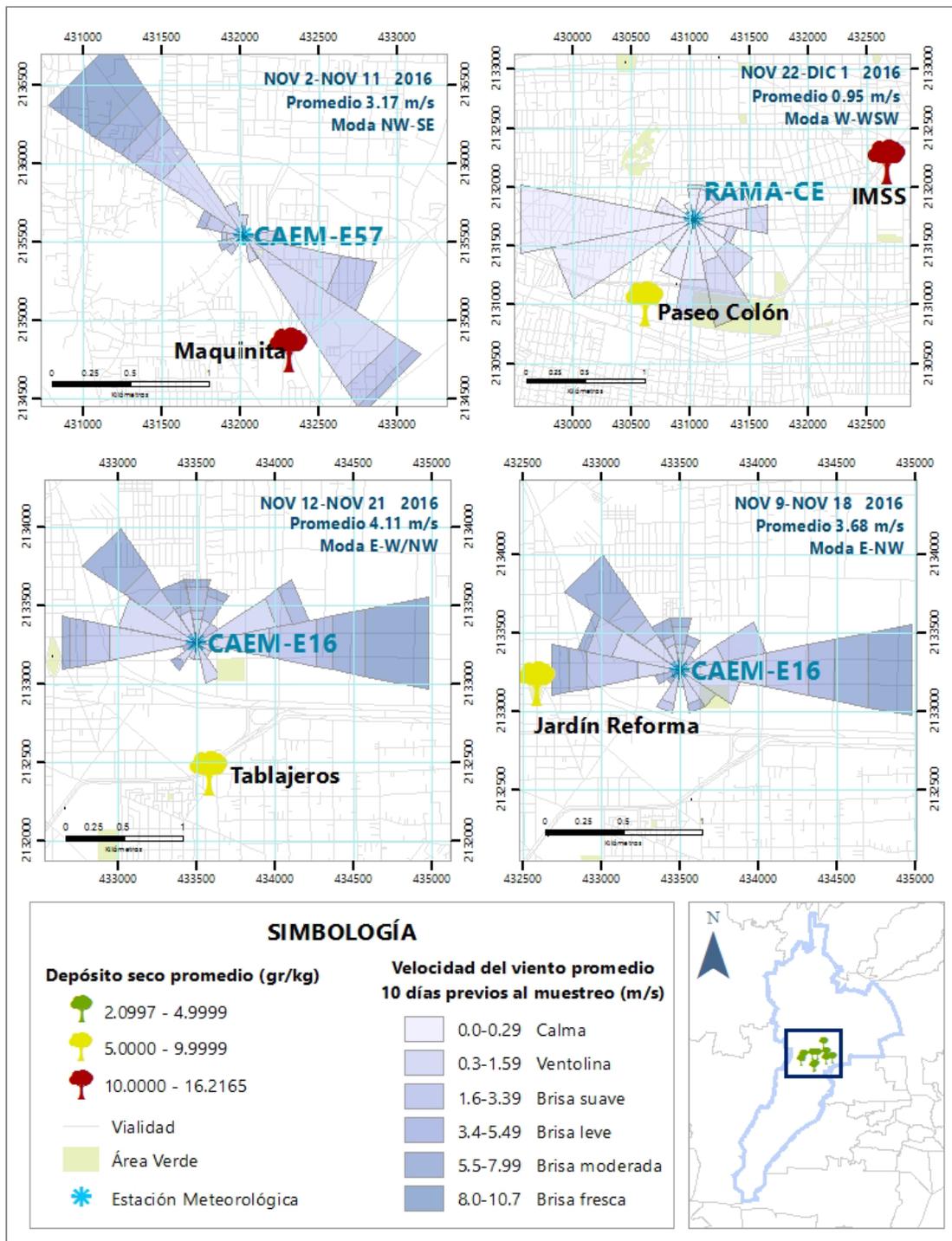


Figura 3.12 A. Velocidad promedio y frecuencia de dirección del viento registradas en las estaciones de referencia 10 días previos a la fecha de muestreo en cada sitio. Elaboración propia con base en resultados del muestreo e información de RAMA (2015), CAEM (2015) y procesamiento de información vectorial de INEGI (2015a).

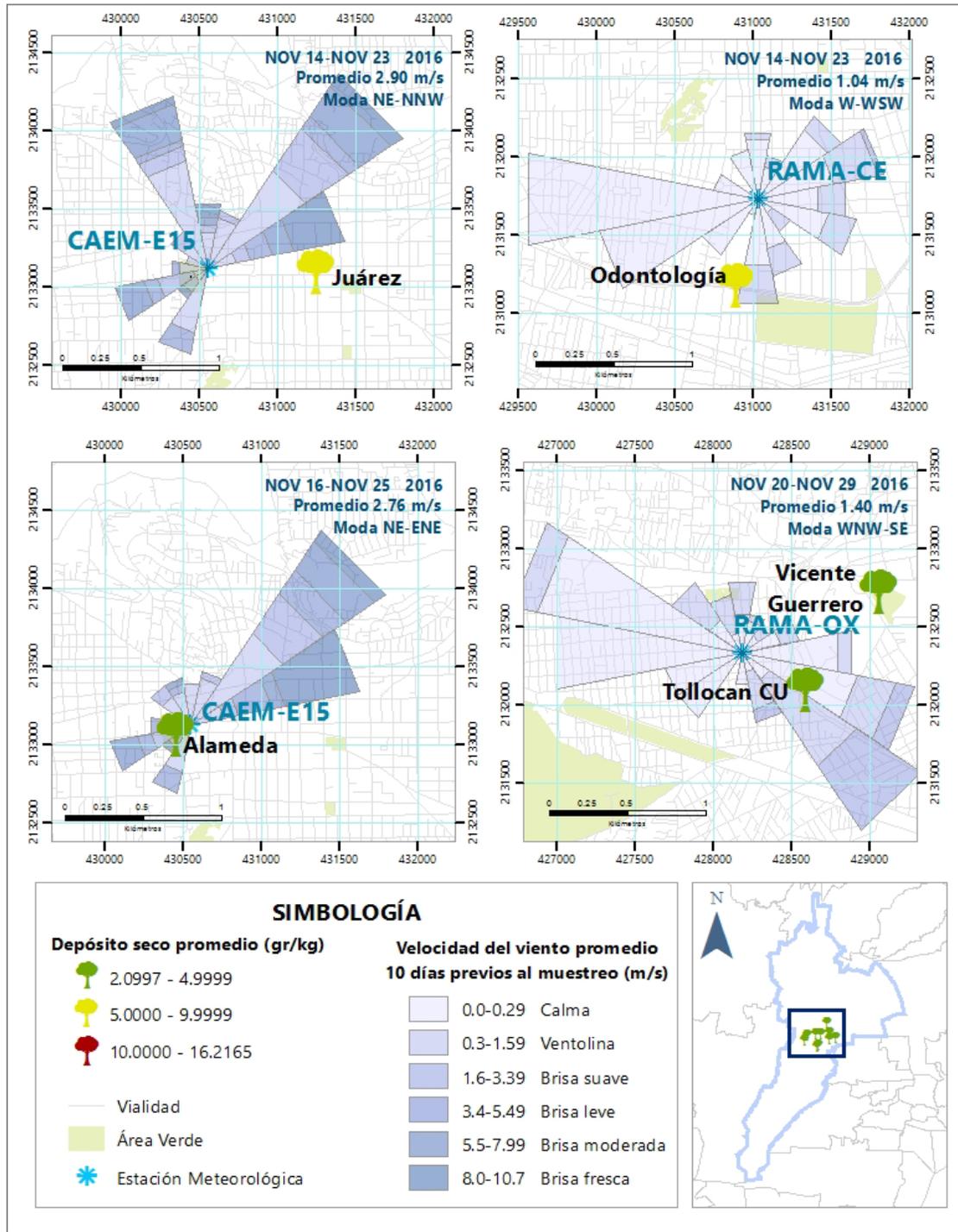


Figura 3.12 B. Velocidad promedio y frecuencia de dirección del viento registradas en las estaciones de referencia 10 días previos a la fecha de muestreo en cada sitio. Elaboración propia con base en resultados del muestreo e información de RAMA (2015), CAEM (2015) y procesamiento de información vectorial de INEGI (2015a).

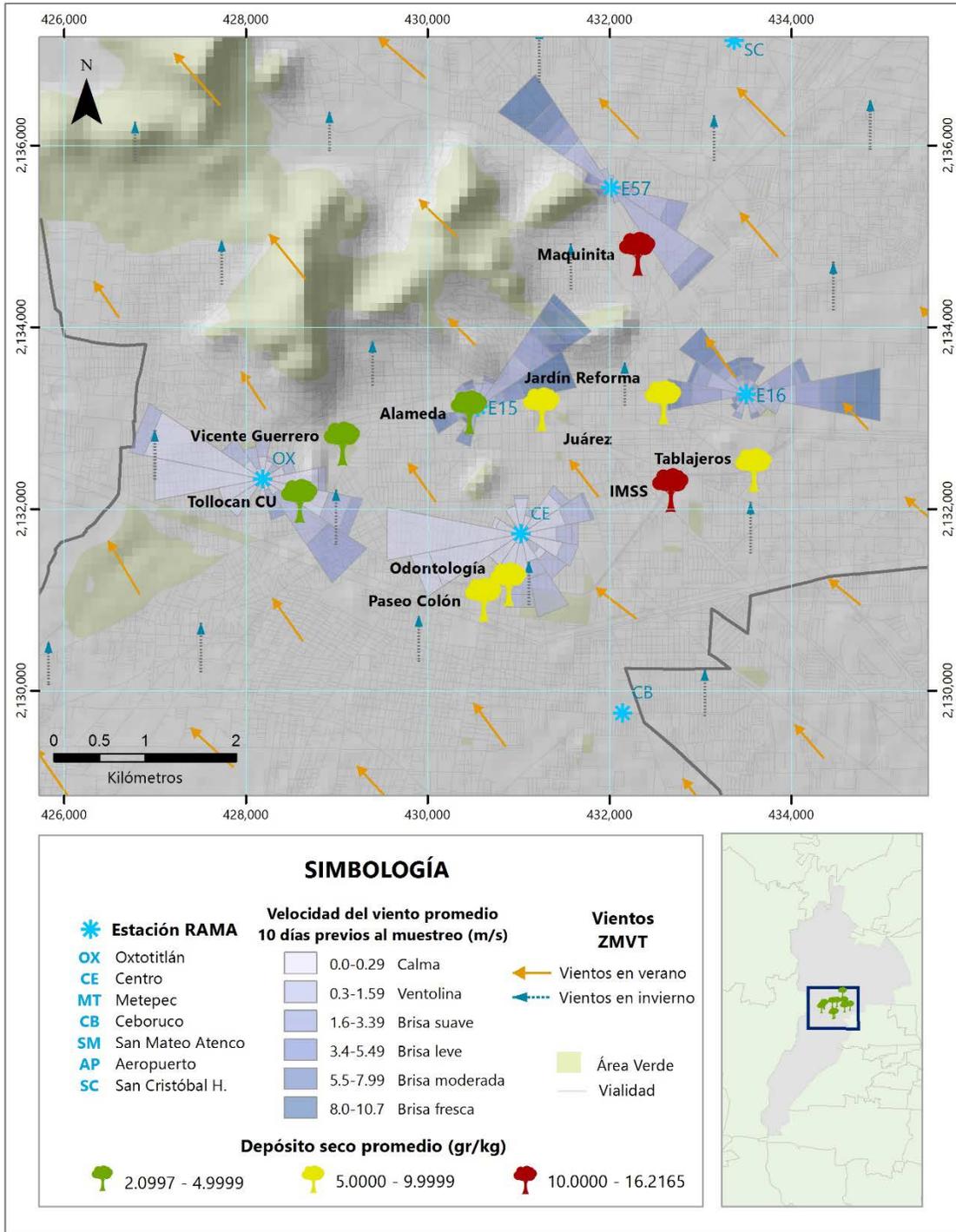


Figura 3.13. Velocidad y dirección del viento registrados en las estaciones de referencia 10 días previos a la fecha de muestreo por sitio, y vientos históricos predominantes en la ZMVT. Elaboración propia con base en resultados del muestreo, Inventario de Emisiones 2004 de la ZMVT (Secretaría del Medio Ambiente, 2007) y procesamiento de información vectorial de INEGI (2015a).

CAPÍTULO 4

CARACTERÍSTICAS DE LAS ESPECIES ANALIZADAS A CONSIDERAR EN LA FORESTACIÓN



Con base en el depósito seco encontrado en las hojas de estas cuatro especies de árboles, y considerando el número de ejemplares con un valor de depósito seco superior a los 10 g kg⁻¹ (69.2%), la familia Cupressaceae podría ser la más recomendable de las especies analizadas a plantar en el municipio de Toluca y su zona metropolitana, con la finalidad de incrementar la captura de material particulado, aunque debe considerarse el amplio rango de variabilidad en los datos de depósito obtenido en los ejemplares de esta familia.

No obstante, la conformación de áreas verdes no debe limitarse a un solo criterio o grupo de especies en un territorio, situación que reduciría la diversidad y la provisión de otros servicios ecosistémicos. Además, el uso de una o pocas especies no puede ser generalizado en todos los sitios, debido a que cada especie y cada espacio poseen condiciones específicas que influyen en el desarrollo de la vegetación y en la captura de material particulado.

En este sentido, se presentan algunas características y necesidades de las especies analizadas, seguida de las recomendaciones para cada especie en el municipio.

4.1 Características de habitabilidad de las especies analizadas

De acuerdo con Yang et al. (2005) y Barima et al. (2014), deben considerarse varios criterios relacionados con la habitabilidad de los árboles en el espacio urbano, de manera que se disminuya el impacto negativo de la vegetación frente a los contaminantes y se reduzcan al mínimo las necesidades de mantenimiento. Se presentan en el cuadro 4.1 algunas de estas características de las especies analizadas.

Enseguida se desarrollan estos atributos para las cuatro especies, aclarando que esto no representa que deben ser las únicas a elegirse para su plantación; por el contrario, se propone la realización de esta caracterización para evaluar la factibilidad de todas las especies que se tengan contempladas para el enverdecimiento de la ciudad.

Cuadro 4.1. Características y necesidades de habitabilidad de Cupressaceae (fam.), *F. uhdei*, *L. lucidum* y *L. styraciflua*

Nombre científico	Cupressaceae (familia)	<i>Fraxinus uhdei</i>	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Liquidambar styraciflua</i>
Nombre común	Enebros, cipreses y tulias	Fresno	Trueno	Liquidámbar
Origen	Este del Mar Mediterráneo y oeste de Asia.	México.	Asia (China, Japón y Corea).	Norteamérica (incluye México).
Condición reproductiva	Monoicos o dioicos	Dioico	Monoico	Monoico y poligamodioico
Follaje	Perennifolio	Caducifolio	Perennifolio	Subcaducifolio o caducifolio
Copa	Columnar o cónica; hasta 2m.	Compacta y redondeada; hasta 5m.	Redonda, frondosa; hasta 5m.	Piramidal u ovoidal; hasta 8m.
Tipo de hoja	Escamiforme.	Pinnaticompuesta, foliolos lanceolados a elípticos; pilosas en abaxial.	Simples ovaladas o lanceoladas.	Simples palmeadas, lobuladas en arreglo espiralado.
Alergenicidad por polen	Severa	Severa	Severa	Moderada
Altura (adulto)	20-25m, hasta 30m	15-30m	6-8m, hasta 30m	30-40m, hasta 60m
Tipo de raíz	Pivotante	Pivotante	Superficial	Pivotante
Tolerancia ambiental	Buena a sequías. Tolerante a smog	Buena a heladas, sequías y contaminación	Buena a sequías y contaminantes	Moderada a sequía/heladas ozono y fluoruros
Riego	Moderado	Moderado	Moderado	Necesario
Crecimiento	Moderado-rápido	Moderado-rápido	Moderado-rápido	Moderado-rápido
Emisiones biogénicas	<i>Cupressus sp</i> : Bajas en monoterpenos, considerables en isoprenos <i>Juniperus sp</i> : Considerables en monoterpenos e isoprenos	Considerables en monoterpenos. Resultados contradictorios en isoprenos	Resultados contradictorios en monoterpenos e isoprenos	Considerables en monoterpenos e isoprenos

FUENTE: Elaboración propia con base en Benavides et al. (2011); Calderón et al. (2015); Lesur (2011); Martínez (1979); Niembro (1986); Pollen.com (2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e, 2016f); Secretaría de Ecología GEM (1995); Stewart & Scholefield (2016); UFEI (2016a, 2016b, 2016c, 2016d); Vázquez et al. (1999); Vecinos Verdes (2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e) y Zamudio & Carranza (1994).

4.1.1. Origen

De acuerdo con la Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-015-SMA-DS-2012, que establece las condiciones de protección, conservación, fomento y creación de las áreas arboladas y verdes de las zonas urbanas en el territorio del Estado de México, en la forestación de áreas verdes debe privilegiarse el uso de especies endémicas o nativas, por lo que los árboles de fresno y liquidámbar son los más adecuados para establecer en el municipio de Toluca, ya que al ser nativos de México poseen una mejor capacidad de adaptación al sitio y tienen depredadores naturales que regulan su población; esto hace que las tasas de supervivencia puedan ser más altas y se requieran menos recursos para el mantenimiento de estas especies.

Por el contrario, las especies introducidas (trueno y Cupressaceae) suelen tener menor competencia y ser más oportunistas, lo que puede desplazar a las nativas y endémicas e incrementar el riesgo de pérdida de biodiversidad.

4.1.2. Condición reproductiva

Existen dos situaciones a tomar en cuenta en espacios urbanos con base en este criterio.

La primera es que desde el punto de vista ecológico es preferible tener especies dioicas (Cupressaceae y fresnos), debido a que por su variabilidad genética pueden ser más resistentes a largo plazo; para este caso, deberá asegurarse que los ejemplares de la misma especie estén situados a distancias relativamente cortas, en parques o jardines extensos, o bien, en camellones donde el flujo del viento favorezca la fecundación. También es importante que los ejemplares sean adquiridos en diferentes viveros o que provengan de diferentes progenitores, de manera que se evite la endogamia.

Por otro lado, las especies monoicas poseen la ventaja de ocupar un hábitat a una mayor velocidad que las anteriores, al no requerir de una pareja reproductiva, por lo que este tipo de especies (trueno y liquidámbar) pueden ser más recomendables para el caso de polígonos aislados dentro de las ciudades.

4.1.3. Follaje

En cuanto a este criterio, es preferible utilizar especies perennifolias para la captura de contaminantes atmosféricos, debido a que el proceso de biorremediación se mantiene continuo. No obstante, el daño en las plantas puede ser más severo, ya que no renuevan sus aparatos, aunque esto dependerá de su grado de tolerancia a los contaminantes. Al respecto, Ledesma (2014) encontró una mayor sensibilidad a los contaminantes en *Juniperus* sp. (pertenece a Cupressaceae) que en árboles de trueno dentro de la ZMVT.

Por otra parte, las especies caducifolias pueden ser menos susceptibles a los impactos dañinos debido a la renovación de sus estructuras foliares, aunque por esta misma razón la captura de partículas y otros contaminantes se ve disminuida durante este periodo. Esta situación debe ser especialmente considerada en la ZMVT, en la que las concentraciones mayores de material particulado se han registrado en invierno. Aunado a esto, la caída de hojas puede generar descontento en algunas personas por el incremento de los recursos destinados para la limpieza.

Sin embargo, debe destacarse que las especies caducifolias generan mayor comodidad térmica, ya que durante la época cálida proporcionan sombra e incrementan la humedad, mientras que en invierno permiten el paso de la radiación solar para calentar edificios (Sorensen et al., 1999; Galindo & Victoria, 2012).

Considerando lo anterior, lo más recomendable es la combinación de ambos tipos de follaje para compensar la cantidad de calor recibida, la captura de contaminantes y los efectos negativos en las plantas.

4.1.4. Características de la copa

En general, las estructuras más anchas tendrán una mayor superficie de captación de contaminantes, además de proporcionar un sombreado más extenso. Tomando en cuenta este criterio, la especie más adecuada es liquidámbar, seguida de fresno y trueno. La familia Cupressaceae se posiciona en último lugar, por tener copas más angostas en comparación a las otras especies.

Sin embargo, en algunos ejemplares de esta familia la ramificación puede comenzar desde unos pocos centímetros del suelo, además de tener una forma columnar y una disposición tortuosa de las hojas, lo que incrementa su superficie de contacto significativamente.

4.1.5. Características de la hoja

Respecto a las características de la hoja, este trabajo coincide con los resultados hallados por Freer-Smith et al. (2004), Freer-Smith et al. (2005), Przybysz et al. (2014) y Beckett et al. (1998), en los que especies de coníferas como la familia Cupressaceae, han resultado más efectivas para la captura de contaminantes en comparación con especies de hojas lanceoladas. Esto puede deberse a su forma escuamiforme, que otorga mayor rugosidad a esta superficie de contacto.

En cuanto al fresno, la acumulación puede deberse a las pilosidades presentadas en la superficie abaxial de las hojas. Por su parte, el trueno y liquidámbar presentan hojas con superficies de contacto más lisas en ambas superficies (abaxial-adaxial), lo que puede reducir la cantidad de depósito de partículas.

Otra característica atribuida a la hoja es la protección ante la radiación solar, que suele ser mayor en hojas lanceoladas. En cuanto a la adhesividad, ésta se ha asociado con el grado de aclimatación a la radiación solar, siendo mayor en hojas expuestas a la luz (Björkman, 1981; citado en Bussotti & Pollastrini, 2015).

4.1.6. Alergenicidad por polen

Otra característica importante a considerar en la vegetación es la emisión de polen, debido a su potencial para generar alergias y provocar reacciones inflamatorias en el aparato respiratorio de personas sensibles, principalmente asmáticas.

Se han asociado incrementos de las concentraciones de polen con el aumento de temperatura, condiciones de baja humedad atmosférica y velocidades de viento altas (Bronillet, 1996; Calderón et al., 2015; Robledo et al., 2015).

Cadman (1991; citado en González et al., 1999) menciona que a concentraciones de polen mayores a 200 granos/m³ se pueden presentar estas reacciones alérgicas, situación que

se agrava con el incremento de la temperatura y la disminución de la humedad y la precipitación (Calderón et al., 2015); aunque también cuando la humedad se incrementa las partículas de polen pueden hidratarse y fragmentarse (World Allergy Organization, 2011).

En este sentido, el fresno, trueno y especies de Cupressaceae son considerados fuertes productores de polen alergénico, mientras que el polen de liquidámbar presenta una alergenicidad moderada (Calderón et al., 2015; Pollen.com, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e, 2016f; UFEI, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d).

Esta situación plantea que ninguna de las especies analizadas en este trabajo, a excepción del liquidámbar, sería recomendable para plantar en la ciudad; no obstante la mayoría de partículas de polen poseen diámetros superiores a los 10 μm (Litschke & Kuttler, 2008), por lo que sus efectos pueden limitarse a las personas sensibles en comparación con otras partículas de la fracción respirable (PM_{10} e inferiores), que pueden afectar a la totalidad de la población por su capacidad para depositarse en el aparato respiratorio profundo.

Considerando lo anterior, lo más recomendable es constituir áreas verdes que combinen diferentes especies, incluyendo las de polen con baja alergenicidad, de manera que se disminuyan los riesgos de la población sensible. Al respecto, pueden constituirse masas vegetales con diferentes superficies de contacto, que contrarresten la emisión de polen con su captura.

También es importante el monitoreo constante de los bioaerosoles para informar a la población alérgica sobre los días en los que se puedan presentar elevadas concentraciones. En este contexto, destaca el trabajo de Gutiérrez et al. (2010) mencionado previamente, y la presencia de una estación de muestreo de calidad biológica del aire ubicada en el Hospital Materno Infantil del ISSEMyM (19°18'24.32"N, 99°37'47.68" W), administrada por la Red Mexicana de Aerobiología y el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM (REMA, 2016).

4.1.7. Altura

La altura de la vegetación es una característica determinante en la captura de contaminantes, en el mantenimiento necesario para su desarrollo y en el riesgo probable de caída.

En cuanto a la captura de contaminantes, la exposición de la población podría verse disminuida en la vegetación de menor altura, debido a que se encuentran en el rango de estatura promedio humana (*C. sempervirens*, algunos ejemplares de *Juniperus sp.*, trueno, liquidámbar) y los contaminantes pueden ser capturados inmediatamente después de la emisión. Sin embargo, los árboles más altos (fresno) pueden llegar a tener una mayor superficie de contacto, por lo que pueden capturar más contaminantes (Beckett et al., 2000).

Cabe destacar que esta capacidad está fuertemente relacionada con la forma de la copa y las características de la hoja, así como la altura de ramificación de las plantas que puede iniciar desde alturas muy pequeñas, como en el caso de los Cupressaceae.

En estratos arbustivos o árboles pequeños existe una mayor facilidad de mantenimiento, debido a que en general requieren de menos equipo y personal. No obstante, los árboles más altos pueden presentar mejores condiciones de supervivencia al estar mejor establecidos, prestar mayores superficies de sombreado, y almacenar más carbono.

Referente a la caída, los árboles más altos pueden causar daños más graves que los pequeños, sin embargo, esta condición dependerá más de las condiciones de salud del árbol, del tipo de crecimiento de su raíz, de la forma en que se realizó su plantación y en su caso, de la forma en que se realizaron podas. Árboles altos que estén desprovistos de hojas y ramas en la parte inferior a causa de un mal desmoche (simulando la apariencia de un alfiler) hacen que se modifique su centro de masa; debido a que el peso no está bien distribuido se incrementa la posibilidad de su caída con la presencia de viento intenso ($\geq 17.2 \text{ m s}^{-1}$).

4.1.8. Tipo de raíz

Las especies más adecuadas para la forestación de áreas verdes, sobre todo lineales, son aquellas que presentan una raíz pivotante (profunda), debido a que el riesgo de alteración de infraestructura vial y residencial es menor que en las de raíz superficial. En este sentido, la familia Cupressaceae, fresnos y liquidámbar presentan condiciones más favorables.

Las especies con crecimiento de la raíz superficial (paralela a la superficie terrestre) pueden ser también aprovechadas, aunque su uso debe limitarse a zonas amplias como parques urbanos y otras áreas verdes de mayor extensión, en los que no se tenga contemplada la construcción.

Es importante destacar que el crecimiento y forma de la raíz dependerá en gran medida de la plantación y podas realizadas a cada ejemplar, debido a que su mala realización puede enredarla, modificar su forma de crecimiento y anclaje, e incrementar el riesgo de daño a la infraestructura.

4.1.9. Tolerancia ambiental y necesidades de riego

Los cuatro árboles analizados en este trabajo resultan adecuados para la plantación en el municipio de Toluca, debido a su elevada tolerancia a algunos contaminantes y sequías. Ésta última debe considerarse cuando los ejemplares se han adaptado al sitio, lo que ocurre aproximadamente dos años después de su plantación, o meses después de su reubicación.

En relación con lo anterior, los árboles de liquidámbar necesitan riego en sus primeras etapas de crecimiento, lo que implica cuidados adicionales. Fresnos y truenos también requieren riego en su etapa juvenil, aunque éste es moderado. Respecto a la familia Cupressaceae, es conveniente el riego frecuente durante época de estiaje, aunque toleran bien la sequía. En cuanto a heladas, fresno y liquidámbar son tolerantes en su etapa adulta (Vázquez et al, 1999; Benavides et al., 2011; Lesur, 2011).

Posterior al establecimiento de los ejemplares, y debido a las condiciones del municipio, en que suele presentar cinco meses con lluvia, además de precipitaciones esporádicas en la época de estiaje, muy posiblemente las necesidades de riego sean mínimas en estas especies.

4.1.10. Crecimiento

La velocidad de crecimiento influye en los recursos necesarios en las primeras etapas de vida del árbol, en lo que éste se establece a su hábitat. Además, a mayor velocidad de crecimiento, puede ser también más rápida la provisión de servicios ecosistémicos en el ambiente urbano.

En este sentido, todas las especies analizadas en este trabajo presentan condiciones favorables debido a una velocidad de crecimiento moderada a rápida, por lo que su establecimiento puede mejorar notablemente las condiciones de la imagen urbana y los beneficios de captura de contaminantes posterior a los dos años de cada ejemplar.

4.1.11. Emisiones biogénicas

La vegetación también es responsable de la emisión de sustancias contaminantes como el metano, CO₂ y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's). Éstos últimos son conocidos dentro de los inventarios de emisiones como emisiones biogénicas, siendo los más representativos los monoterpenos e isoprenos, compuestos generados de manera natural principalmente durante la síntesis de acetil coenzima A, y son sustancias precursoras de contaminantes secundarios debido a su alta reactividad atmosférica con radicales hidroxilo, nitrato y ozono.

En el municipio de Toluca, Quezada (2006) estimó a partir de datos del año 2000, una emisión biogénica de 524.5 ton/año de monoterpenos y 211.8 ton/año de isoprenos, hallando una concentración más elevada durante la época de lluvias.

La información presentada en este apartado fue obtenida del proyecto *SelecTree*, del Urban Forest Ecosystem Institute de la Universidad Estatal Politécnica de California, y en mayor medida de un proyecto encabezado por Stewart & Scholefield (2016) de la Universidad de Lancaster, en el que desarrollan una base de datos construida de investigaciones de emisiones de monoterpenos e isoprenos de diferentes especies a nivel mundial, por lo que los resultados de emisiones de COV's por especie no fueron obtenidos con la misma metodología, ni realizadas en el mismo sitio. Por consiguiente, deben considerarse las limitaciones de esta información, al tiempo que se promueve el estudio de emisiones biogénicas en estas especies en la zona de estudio.

Aclarado lo anterior, las emisiones de monoterpenos dependen del género y especie en la familia Cupressaceae: en general, mientras que en *Cupressus sp.* (cipreses) se presentan cantidades poco significativas de emisión, en *Juniperus sp.* (enebros) son altas. También se han encontrado emisiones significativas de monoterpenos en liquidámbar. En fresno y trueno se han encontrado resultados contradictorios.

Respecto a la emisión de isoprenos, se han encontrado emisiones significativas en la familia Cupressaceae y liquidámbar, mientras que en fresno y trueno se han presentado resultados contradictorios.

4.2 Recomendaciones para las especies analizadas a considerar en una propuesta de forestación

Tomando en cuenta las condiciones anteriormente mencionadas para las especies analizadas en este trabajo, y haciendo énfasis en favorecer la captura de material particulado, se presentan a continuación recomendaciones generales para su establecimiento en el municipio de Toluca, y posiblemente en su zona metropolitana.

4.2.1. Recomendaciones para Cupressaceae (exclusivo para *Cupressus sempervirens*, *Thuja sp.* y *Juniperus sp.*)

Al ser una de las especies en las que se encontraron ejemplares con depósito seco superior a los 10 g kg⁻¹ en sus hojas, además de acumular contaminantes de manera constante (perennifolia), esta familia de especies es recomendable para usarse de manera combinada con otras plantas en camellones, vialidades y paraderos de transporte público. Además, puede constituir barreras frente a los contaminantes al colocarse cerca de la periferia de áreas verdes de mediana a amplia extensión (parques y jardines). Sin embargo, esta especie no debe exponerse de manera directa o aislada en los sitios contaminados debido a su susceptibilidad a los contaminantes (Ledesma, 2014).

Por sus características de copa y raíz, es posible colocarla también como árbol de alineación en conformación tresbolillo, intercalada con otros tipos de vegetación que incluyan especies caducifolias y vegetación arbustiva.

No es recomendable establecerla en abundancia en zonas cercanas a centros escolares o centros de asistencia médica, debido a que puede incrementar las molestias por alergias en esta población.

4.2.2. Recomendaciones para *Fraxinus uhdei* (fresno)

Esta especie es recomendable para colocarse en espacios de mediana a amplia extensión, como parques, jardines o glorietas, ya que aunque su raíz no es superficial, se podría maximizar su desarrollo en estos espacios, además de incrementar su valor estético.

También se puede plantar en centros comerciales o de servicios, terminales de autobuses, y estacionamientos que contemplen un espacio mínimo de cuatro metros de radio alrededor del tronco (de conformidad con la NTEA-015-SMA-DS-2012), debido a que proporcionan una amplia superficie de sombreado. Es muy importante dejar este espacio, para asegurar el desarrollo adecuado de las raíces y que durante la caída de hojas el material foliar sea reintegrado al suelo. De igual forma, se recomienda que las especies plantadas en cada sitio provengan de diferentes lugares, de modo que se favorezca su variabilidad genética.

No es recomendable usarlo en la cercanía de centros de asistencia médica ni centros escolares, debido a que puede agravar las alergias de personas sensibles al polen.

4.2.3. Recomendaciones para *Ligustrum lucidum* (trueno)

El trueno no es una especie nativa de México, por lo que aunque es bueno conservar los ejemplares existentes, la promoción a su forestación debe limitarse y ser complementaria en áreas verdes de mediana extensión.

4.2.4. Recomendaciones para *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar)

Liquidámbar ha sido utilizado ornamentalmente por la belleza de las tonalidades que adquieren sus hojas durante el otoño, por lo que puede ser utilizado en áreas de mediana a amplia extensión con fines estéticos, como en hospitales. Sin embargo, debido a los requerimientos de humedad en el suelo, su tolerancia moderada a contaminantes y sus

considerables emisiones biogénicas no es una especie totalmente recomendable para el municipio de Toluca.

En general, todas las especies pueden potencializar sus servicios ecosistémicos al plantarse en áreas verdes compuestas por varios estratos (herbáceo, arbustivo y arbóreo), de modo que se puedan incrementar las superficies de contacto para la captura de contaminantes, se incrementen los procesos ecológicos y se mejora la imagen urbana.

Tomando como base los criterios anteriores, y promoviendo la diversificación de especies, sobre todo de las nativas (NTEA-015-SMA-DS-2012), se deben considerar otras plantas para la forestación en municipio de Toluca (Cuadro 4.2), reiterando la importancia de realizar una caracterización en términos de la captura de contaminantes y de su habitabilidad en el ambiente urbano antes de decidir su plantación.

Cuadro 4.2. Especies sugeridas para la ciudad de Toluca.

Nombre científico	Nombre común
<i>Crataegus mexicana</i>	Tejocote
<i>Tecoma stans</i>	Tronadora, retama
<i>Sambucus mexicana</i>	Sauco
<i>Prunus serotina sub. capuli</i>	Capulín
<i>Morus celtidifolia</i>	Mora mexicana
<i>Erythrina americana</i>	Colorín
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce
<i>Chiranthodendron pentadactylon</i>	Árbol de las manitas
<i>Dodonaea viscosa</i>	Jarilla, ocotillo
<i>Acacia farnesiana*</i>	Huizache
<i>Buddleja cordata*</i>	Tepozán
<i>Juniperus deppeana*</i>	Enebro, táscate
<i>Pinus cembroides*</i>	Pino piñonero

FUENTE: Modificado de Sánchez (2012).

*Especies propuestas por el autor.

Al respecto, debe considerarse que las especies frutales modificadas de Sánchez (2012) no deben plantarse de forma aislada ni en la cercanía de fuentes emisoras, debido a que los contaminantes particulados (incluyendo metales pesados) podrían ser depositados en la superficie de los frutos y posteriormente ser consumidos e ingresar al organismo de la población.

En sitios en los que el mantenimiento no pueda realizarse frecuentemente debido a la limitación de recursos o por otras dificultades como la falta de agua, es recomendable el uso de especies para xerojardinería (crasuláceas, cactáceas). De igual modo, se sugiere utilizar estas especies en techos y muros, que representan espacios factibles para la forestación en donde no existan terrenos disponibles.

En relación con lo anterior, la distribución de los espacios verdes debe diversificarse en todo el municipio, dando prioridad a los centros de concentración de población, como en zonas comerciales y de servicios, hospitales, escuelas y paraderos de transporte público.

Se recomienda también la colocación de vegetación urbana en la cercanía de las fuentes emisoras, que en el municipio de Toluca podrían ubicarse como barreras rompevientos en los límites de áreas agrícolas erosionadas y en vías de comunicación con tránsito lento y alta concurrencia.

Finalmente, debe tenerse claro que la única solución contundente a los problemas de contaminación atmosférica y otros relacionados con el deterioro ambiental no podrán ser solucionados en su totalidad a menos que se controlen las causas que lo originan. No obstante, en el camino para alcanzar esta meta las áreas verdes pueden ser una estrategia a costo relativamente bajo, al tiempo que proporcionan otros servicios ecosistémicos y pueden mejorar la salud ambiental, reflejada en el bienestar humano de los habitantes de un territorio.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



5.1 Conclusiones

La cuantificación del depósito seco en hojas de árboles de la familia Cupressaceae (cipreses, enebros), *Fraxinus uhdei* (fresno), *Ligustrum lucidum* (trueno) y *Liquidambar styraciflua* (liquidámbar) permitió conocer las diferencias de material particulado que puede ser capturado por estas especies en el municipio de Toluca.

Se presentó una amplia variabilidad en los resultados obtenidos por especie y sitio, por lo que se realizó un análisis descriptivo de los valores de depósito seco de todos los ejemplares. En este sentido, los árboles de la familia Cupressaceae predominaron entre los árboles con depósito seco elevado ($>10 \text{ g kg}^{-1}$), mientras que la mayoría de los ejemplares de fresno y trueno capturaron $<10 \text{ g kg}^{-1}$; y los liquidámbares capturaron con mayor frecuencia $<5 \text{ g kg}^{-1}$.

Estos resultados aportaron elementos para confirmar parcialmente la hipótesis planteada en este trabajo, al ser los ejemplares de la familia Cupressaceae (cipreses, enebros) los que presentan una superficie de contacto más tortuosa en comparación con las otras especies analizadas; no obstante, es necesario incrementar el conocimiento del comportamiento de estas especies en el municipio de Toluca para confirmar por completo este planteamiento.

Los sitios en los que se encontraron concentraciones de depósito superiores a los 10 g kg^{-1} fueron Maquinita, IMSS, Tablajeros y Odontología, zonas altamente transitadas por vehículos y con importantes concentraciones de población, incluyendo niños y personas enfermas. Por el contrario, se encontró un depósito de partículas inferior a los 5 g kg^{-1} en los sitios Alameda y Vicente Guerrero, con tránsito vehicular más moderado.

No se encontró una relación directa de la precipitación ($\leq 4.5 \text{ mm}$), dirección y velocidad del viento con el contenido del depósito seco de material particulado, sin embargo, estas variables son las que determinan en gran medida el comportamiento de las partículas en la atmósfera y en su captura por parte de la vegetación urbana, por lo que deben ser analizadas con mayor detalle en futuras investigaciones.

5.2 Recomendaciones

El estudio de los mecanismos de deposición partículas-vegetación debe incluir más variables, así como la realización de diseños experimentales más controlados y delimitados, o metodologías que permitan realizar estimaciones más precisas respecto al beneficio de descontaminación por parte de la vegetación urbana.

Al respecto, pueden generarse nuevos trabajos que determinen la velocidad de deposición a nivel de especie; el análisis anatómico y fisiológico de las hojas de las especies analizadas; la determinación de factores de enriquecimiento en los sitios; la medición de variables meteorológicas *in situ*, con énfasis al análisis de los movimientos turbulentos; el estudio de las interacciones existentes con otros organismos; la evaluación de los contaminantes transferidos al suelo por mecanismos de deposición; entre otros.

Por otra parte, es importante que los resultados derivados de esta y otras investigaciones relacionadas sean realmente tomados en cuenta por las autoridades encargadas de la gestión de las áreas verdes en el municipio de Toluca, además de ser incluidas dentro de un Programa Integral de Creación, Mantenimiento y Restauración de Áreas Verdes Urbanas, en el que se fomente la participación de diversos sectores de la sociedad en el diseño, implementación y evaluación del mismo.

Lo anterior permitiría conocer el estado actual de los árboles en el municipio de Toluca, identificar las necesidades específicas de los mismos, así como potencializar los servicios ecosistémicos que proporcionan, mejorando la salud ambiental y con ello la calidad de vida de los habitantes de este territorio.

REFERENCIAS

- Adame, S., & Cadena, E. (2011). Transformaciones territoriales y proceso de poblamiento en el Valle de Toluca 1960-2005. En *Entorno Regional de la Ciudad de Toluca, Estado de México* (1.ª ed., pp. 41-64). Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- Alcalá, J., Rodríguez, J. C., Tiscareño, M. Á., Hernández, A., Tapia, J. J., Loredó, C., & Villaseñor, E. (2011). Mitigación Del Impacto Ambiental Del Polvo Atmosférico a través de *Prosopis laevigata* y *Schinus molle*, San Luis Potosí, México. *Multequina*, (20), 83-96. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=42824203007>.
- Alcalá, J., Sosa, M., Moreno, M., Quintana, C., Campos, A., & Holguin, C. (2008). Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras en la planeación urbana sustentable: ciudad de Chihuahua, México. *Multequina*, (17), 17-28. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-73292008000100001.
- Allen, R., Criqui, M., Diez, A., Allison, M., Shea, S., Detrano, R., Kaufman, J. (2009). Fine Particulate Matter Air Pollution, Proximity to Traffic, and Aortic Atherosclerosis. *Epidemiology*, 20(2), 254-264. <http://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31819644cc>.
- Alvarez, M. (1996). *Áreas Verdes y Gestión Local*. Tesis de maestría. El Colegio de la Frontera Norte-Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Alves, D., Osório, D., Rodrigues, M., Illi, J., Bianchin, L., & Benvenuti, T. (2015). Concentrations of PM_{2.5-10} and PM_{2.5} and metallic elements around the Schmidt Stream area, in the Sinos River Basin, southern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 75(4 Suppl 2), 43-52. <http://doi.org/10.1590/1519-6984.00113suppl>.
- Araujo, J. (2011). Particulate air pollution, systemic oxidative stress, inflammation, and atherosclerosis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 4(1), 79-93. <http://doi.org/10.1007/s11869-010-0101-8>.
- Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Luna Azul*, (34), 195-213.
- Armstrong, W. (2001). Photosynthesis. Recuperado el 27 de mayo de 2016, a partir de <http://waynesword.palomar.edu/photosyn1.htm>.
- Ballester, J., & Morata, A. (2001). *Normas para la clasificación de los espacios verdes* (1.ª ed.). Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Barima, Y., Angaman, D., N'gouran, K., Koffi, N., Kardel, F., De Cannière, C., & Samson, R. (2014). Assessing atmospheric particulate matter distribution based on Saturation Isothermal Remanent Magnetization of herbaceous and tree leaves in a tropical urban environment. *The Science of the total environment*, 470-471, 975-82. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.082>.
- Barradas, V. (2000). Energy balance and transpiration in an urban tree hedgerow in Mexico City. *Urban Ecosystems*, 4(1), 55-67. <http://doi.org/10.1023/A:1009591803532>.

- Beckett, K., Freer-Smith, P., & Taylor, G. (2000). The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal*, 24(2-3), 209-230. <http://doi.org/10.1080/03071375.2000.9747273>.
- Beckett, K., Freer-Smith, P., & Taylor, G. (1998). Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99(3), 347-360. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749198000165>.
- Benavides, H., Gazca, M., & López, S. (2011). *Especies de árboles y arbustos frecuentes en la 2ª. Sección del Bosque de Chapultepec. Folleto Técnico No. 5 CENID-COMEF (1.ª ed.)*. México, D.F.: INIFAP.
- Bronillet, I. (1996). An annual study of airborne pollen in northern Mexico City. *Aerobiologia*, 12(3), 191-195. <http://doi.org/10.1007/BF02447412>.
- Burkhardt, J., & Pariyar, S. (2014). Particulate pollutants are capable to 'degrade' epicuticular waxes and to decrease the drought tolerance of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Environmental pollution*, 184, 659-67. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.041>.
- Bussotti, F., & Pollastrini, M. (2015). Evaluation of leaf features in forest trees: Methods, techniques, obtainable information and limits. *Ecological Indicators*, 52, 219-230. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.010>.
- CAEM (2015). Bases de datos meteorológicos registrados en las estaciones de la Comisión del Agua del Estado de México. Octubre-Diciembre 2015. Toluca: Comisión del Agua del Estado de México.
- Calderón, M., Guerrero, C., Martínez, B., Fuentes, F., Téllez, F., López, E., Calderón, M., Martínez, A., & Trigo, M. (2015). First airborne pollen calendar for Mexico City and its relationship with bioclimatic factors. *Aerobiologia*. <http://doi.org/10.1007/s10453-015-9392-4>.
- Catinon, M., Ayrault, S., Spadini, L., Boudouma, O., Asta, J., Tissut, M., & Ravanel, P. (2011). Tree bark suber-included particles: A long-term accumulation site for elements of atmospheric origin. *Atmospheric Environment*, 45(5), 1102-1109. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.038>.
- Centro Mario Molina (2014). *Estudio del Sistema Integral de Movilidad Sustentable para el Valle de Toluca*. Recuperado a partir de <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2015/01/Documento-de-difusión-Movilidad-Sustentable-Toluca.pdf>.
- Comisaría de Seguridad Vial (2015). Aforo Anual en vialidades de la Ciudad de Toluca. Toluca: H. Ayuntamiento de Toluca. Información obtenida mediante solicitud de información.
- CONAGUA (2010). *Manual Teórico Práctico del Observador Meteorológico de Superficie*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (2016). Normales Climatológicas 1951-2010 de la Estación Toluca (DGE). Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>.
- Cosselman, K., Navas, A., & Kaufman, J. (2015). Environmental factors in cardiovascular disease. *Nature reviews. Cardiology*, 12(11), 627-42. <http://doi.org/10.1038/nrcardio.2015.152>.

- Currie, B., & Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 11(4), 409-422. <http://doi.org/10.1007/s11252-008-0054-y>.
- Dadvand, P., Bartoll, X., Basagaña, X., Dalmau-Bueno, A., Martinez, D., Ambros, A., ... Nieuwenhuijsen, M. J. (2016). Green spaces and General Health: Roles of mental health status, social support, and physical activity. *Environment international*, 91, 161-167. <http://doi.org/10.1016/j.envint.2016.02.029>.
- Dalmasso, A., Candia, R., & Llera, J. (1997). La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. *Multequina*, (6), 85-91. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=42800608>.
- Díaz, P., García, I., Iturbe, J. L., Granados, F., & Sánchez, J. C. (1999). Air pollution in the atmosphere of the Toluca Valley, Mexico. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(1), 13-17. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37015102>.
- DOF (2005). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterios para evaluar el valor límite permisible para la concentración de material particulado. Valor límite permisible para la concentración de partículas suspendidas totales PST, partículas menores de 10 micrómetros PM₁₀ y partículas menores de 2.5 micrómetros PM_{2.5} de la calidad del aire ambiente. Criterios para evaluar la calidad del aire. Recuperado a partir de <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/025ssa193.html>.
- Dotor, J. (2014). *Evaluación de los metales Cr, Cu, Zn, Pb y Mn en la atmósfera del Valle de Toluca usando como indicador el depósito seco sobre hojas de trueno común (Ligustrum vulgare) y estimación del riesgo para la salud de la población expuesta*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Durán, B., & Alzate, F. (2009). Intercepción de partículas suspendidas totales (PST) por cinco especies de árboles urbanos en el Valle de Aburrá. *Revista Facultad de Ingeniería*, 47(47), 59-66. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302009000100006&script=sci_arttext.
- Dzierżanowski, K., Popek, R., Gawrońska, H., Sæbø, A., & Gawroński, S. W. (2011). Deposition of Particulate Matter of Different Size Fractions on Leaf Surfaces and in Waxes of Urban Forest Species. *International Journal of Phytoremediation*, 13(10), 1037-1046. <http://doi.org/10.1080/15226514.2011.552929>.
- Ecozona Toluca (2016). Ecozona Toluca: Objetivos. Recuperado 25 de mayo de 2016, a partir de <http://www.ecozonatoluca.mx/objetivos.html>
- Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. (2016). Toluca de Lerdo. Recuperado 23 de mayo de 2016, a partir de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM15mexico/municipios/15106a.html>
- EPA (2000). *Deposition of Air Pollutants to the Great Waters. Third Report to Congress*. North Carolina: Environmental Protection Agency.
- EPA (2008). *Integrated Review Plan for the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter*. North Carolina: Environmental Protection Agency.

- EPA (2016). What is Open Space/Green Space? | Urban Environmental Program in New England. Recuperado 23 de mayo de 2016, a partir de <https://www3.epa.gov/region1/eco/uep/openspace.html>.
- Escobedo, F., & Chacalo, A. (2008). Estimación preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la ciudad de México. *Interciencia*, 33(1), 29-33. Recuperado a partir de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2723456>.
- Flores, J., Peña, P., Balcázar, M., Madrigal, D., Ramos, L., López, A., & Morelos, J. (2010). Estimación del riesgo a la exposición de partículas suspendidas en el Valle de Toluca, 72-80.
- Forsberg, B., Hansson, H.-C., Johansson, C., Areskoug, H., Persson, K., & Järholm, B. (2005). Comparative health impact assessment of local and regional particulate air pollutants in Scandinavia. *Ambio*, 34(1), 11-9. Recuperado a partir de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15789513>.
- Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M. A., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., ... Erisman, J. W. (2009). Atmospheric composition change: Ecosystems–Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43(33), 5193-5267. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.068>.
- Franzaring, J., & van der Eerden, L. (2000). Accumulation of airborne persistent organic pollutants (POPs) in plants. *Basic and Applied Ecology*, 1(1), 25-30. <http://doi.org/10.1078/1439-1791-00003>.
- Freer-Smith, P., Beckett, K., & Taylor, G. (2005). Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* ‘Beaupré’, *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 133(1), 157-167. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749104001228>.
- Freer-Smith, P. H., El-Khatib, A. A., & Taylor, G. (2004). Capture of Particulate Pollution by Trees: A Comparison of Species Typical of Semi-Arid Areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American Species. *Water, Air, & Soil Pollution*, 155(1-4), 173-187. <http://doi.org/10.1023/B:WATE.0000026521.99552.fd>.
- GGEM (2013). Norma Técnica Ambiental Estatal NTEA-015-SMA-DS-2012, que establece las condiciones de protección, conservación, fomento y creación de las áreas arboladas y verdes de las zonas urbanas en el territorio del Estado de México. Recuperado a partir de <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/vigentes/abr12.PDF>
- Galindo, A., & Victoria, R. (2012). La vegetación como parte de la sustentabilidad urbana: beneficios, problemáticos y soluciones para el Valle de Toluca. *Quivera*, 14(1), 98-108. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40123894006>.
- García, M. (2014). *Análisis correlacional entre el incremento de los automóviles particulares y la concentración de partículas menores a diez micrómetros (PM₁₀) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante el periodo 2006-2011*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.

- González, C. (2009). *Análisis de PST por microscopía electrónica de barrido y COV por cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas en el Valle de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- González, M., Cerezo, A., González, M. del C., & Salazar, L. (1999). Comportamiento de las partículas suspendidas y polen en la atmósfera de la región norte de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43(5), 155-164. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47543503>.
- Grantz, D., Garner, J., & Johnson, D. (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment international*, 29(2-3), 213-39. [http://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](http://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2).
- Guarnieri, M., & Balmes, J. (2014). Outdoor air pollution and asthma. *Lancet London*, 383(9928), 1581-1592. [http://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60617-6](http://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60617-6).
- Gutiérrez, J., Romero, E., Reyes, L., Sandoval, A., & Aguirre, C. (2010). Bioaerosoles depositados vía húmeda-seca en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca, *Contacto nuclear*, 58, 17-23.
- Gutiérrez, P. (2013). *Acumulación de contaminantes en especies vegetales en la Zona Metropolitana de Guadalajara*. Tesis de licenciatura. Universidad de Guadalajara.
- H. Ayuntamiento de Toluca (2016a). Plan de Desarrollo Municipal 2016-2018. Toluca: H. Ayuntamiento de Toluca.
- H. Ayuntamiento de Toluca (2016b). *Plan Ecozona Centro de Toluca*. (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) & Proyecto Tierra S.C., Eds.). Toluca: H. Ayuntamiento de Toluca.
- Health Canada (2004). *National Ambient Air Quality Objectives for Particulate Matter: Executive Summary: Part 1: Science Assessment Document. Air Quality*. Recuperado a partir de http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/naaqo-onqaa/particulate_matter_matiere_particulaires/summary-sommaire/index-eng.php.
- HEI Review Panel on Ultrafine Particles. (2013). *Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles. HEI Perspectives 3*. Boston. Recuperado a partir de <http://pubs.healtheffects.org/view.php?id=394>.
- Hofman, J., Wuyts, K., Van Wittenberghe, S., & Samson, R. (2014). On the temporal variation of leaf magnetic parameters: seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown. *The Science of the total environment*, 493, 766-72. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.074>.
- Hu, Y., Zhao, P., Niu, J., Sun, Z., Zhu, L., & Ni, G. (2016). Canopy stomatal uptake of NO_x, SO₂ and O₃ by mature urban plantations based on sap flow measurement. *Atmospheric Environment*, 125, 165-177. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.019>.
- Hussain, M., Madl, P., & Khan, A. (2011). Lung deposition predictions of airborne particles and the emergence of contemporary diseases, Part-I. *The Health*, 2(2), 51-59. Recuperado a partir de http://www.thehealthj.com/may_2011/lung_deposition_predictions_of_airborne_particles.pdf.

- Elom, N., Entwistle, J., & Dean, J. (2014). Human health risk from Pb in urban street dust in northern UK cities. *Environmental Chemistry Letters*, 12(1), 209-218. <http://doi.org/10.1007/s10311-013-0436-0>.
- IGECEM (2014). Estadística Básica Municipal. Toluca. En *Estadística Básica Municipal* (1.ª ed., p. 12). Toluca: Instituto de Información e Investigación Geografía, Estadística y Catastral del Estado de México.
- INEGI (1960). VIII Censo General de Población 1960. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1960/default.aspx>
- INEGI (1970). IX Censo General de Población 1970. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1970/default.aspx>.
- INEGI (1980). X Censo General de Población y Vivienda 1980. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1980/default.aspx>.
- INEGI (1990). XI Censo General de Población y Vivienda 1990. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv1990/default.aspx>.
- INEGI (1999). Censos Económicos 1999. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce1999/default.aspx>.
- INEGI (2000). XII Censo General de Población y Vivienda 2000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/Proyectos/ccpv/cpv2000/default.aspx>.
- INEGI (2004). Censos Económicos 2004. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2004/default.aspx>.
- INEGI (2007). Conjunto de datos vectoriales Edafológicos de la carta E14-02. Serie II (Continuo Nacional). Escala 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825235222>.
- INEGI (2009). Censos Económicos 2009. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/proyectos/censos/ce2009/default.asp?s=est&c=14220>.
- INEGI (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.
- INEGI (2014). Censos Económicos 2014. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ce/ce2014/default.aspx>.

- INEGI (2015a). Conjunto de datos vectoriales de Cartografía geoestadística urbana. Cierre de los Censos Económicos 2014. DENUÉ 01/2015 (México). Escala 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/ficha.aspx?upc=702825004426>.
- INEGI (2015b). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUÉ). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/descarga/>.
- INEGI (2016). Vehículos de motor registrados en circulación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado a partir de http://www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=8.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007). *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. Roma: FAO.
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130-137. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>.
- Konijnendijk, C. C., Nilsson, K., B. Randrup, T., & Schipperijn, J. (2005). *Urban Forests and Trees*. (C. C. Konijnendijk, K. Nilsson, T. B. Randrup, & J. Schipperijn, Eds.) (1.^a ed.). Frederiskberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Kulshreshtha, K., Rai, A., Mohanty, C., Roy, R., & Sharma, S. (2009). Particulate Pollution Mitigating Ability of Some Plant Species. *International Journal of Environmental Research*, 3(1), 137-142. Recuperado a partir de <http://www.bioline.org.br/request?er09016>.
- Lagzi, I., Mészáros, R., Gelybó, G., & Leelőssy, Á. (2013). *Atmospheric Chemistry*. Eötvös Loránd University. Recuperado a partir de <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/index.html>.
- Ledesma, C. (2014). *Efecto de la contaminación atmosférica por metales pesados en las hojas de los árboles de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Lesur, L. (2011). *Árboles de México* (1.^a ed.). México, D.F.: Trillas.
- Leung, D., Tsui, J., Chen, F., Yip, W., Vrijmoed, L., & Liu, C. (2011). Effects of Urban Vegetation on Urban Air Quality. *Landscape Research*, 36(2), 173-188. <http://doi.org/10.1080/01426397.2010.547570>.
- Litschke, T., & Kuttler, W. (2008). On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(3), 229-240. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0284>.
- Martínez, J. (1997). *Áreas Verdes de la Ciudad de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Martínez, M. (1979). *Catálogo de nombres vulgares y científicos de plantas mexicanas* (1.^a ed.). México, D.F.: Fondo de Cultura Económica.
- Millenium Ecosystem Assessment. (2003). Ecosystems and Their Services. En *Ecosystems and Human Well-Being. A Framework For Assessment*. (1.^a ed., p. 212). Island Press. Recuperado a partir de <http://www.unep.org/maweb/documents/document.300.aspx.pdf>

- Mo, L., Ma, Z., Xu, Y., Sun, F., Lun, X., Liu, X., & Yu, X. (2015). Assessing the capacity of plant species to accumulate Particulate Matter in Beijing, China. *PLoS ONE* 10(10), e0140664. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0140664>.
- Morelos, J. (2009). *Análisis univariante de la distribución espacial de las PM₁₀ aerotransportadas en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Tesis de maestría. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Moyano, E., & Priego, C. (2009). Marco teórico para analizar las relaciones entre paisaje natural, salud y calidad de vida. *Sociedad Hoy*, 31-44.
- Niembro, A. (1986). *Árboles y arbustos útiles de México* (1.ª ed.). México, D.F.: Limusa-Noriega.
- Nowak, D., Civerolo, K., Trivikrama, S., Gopal S., Luley, C., & Crane, D. (2000). A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment*, 34(10), 1601-1613. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231099003945>.
- Nowak, D. J., Dwyer, J. F., & Childs, G. (1998). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. En Krishnamurty L. & Rente. J. (Eds.), *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe* (1.ª ed., pp. 17-38). Memoria del Seminario Internacional. México, D.F.: Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.
- ONU. Convenio sobre la Diversidad Biológica (1992). Río de Janeiro. Recuperado a partir de <http://www.un.org/es/events/biodiversityday/convention.shtml>
- Pacheco, H. (2001). *Influencia funcional y ambiental de cuatro parques de la Ciudad de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- PACMUN. (2013). *Plan de Acción Climática Municipal Toluca 2013-2015* (1.ª ed.). Toluca: H. Ayuntamiento de Toluca.
- Pérez, H., Lunagómez, M., & Acosta, L. (2010). Análisis de partículas suspendidas totales (PST) y partículas fracción respirable (PM₁₀), en Cunduacán, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26(2), 151-162. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792010000200003&lng=es&nrm=iso&tlng=pt.
- Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., & Anselmet, F. (2008). Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: Review of present knowledge. *Atmospheric Environment*, 42(16), 3625-3653. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.043>.
- Petroff, A., & Zhang, L. (2010). Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models. *Geoscientific Model Development*, 3(2), 753-769. <http://doi.org/10.5194/gmd-3-753-2010>.
- Philippi, A., & Collet, G. (1998). Enverdecimiento urbano en Brasil. En Krishnamurty L. & Rente. J. (Eds.), *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe* (1.ª ed., pp. 199-229). Memoria del Seminario Internacional. México, D.F.: Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Universidad Autónoma Chapingo.
- PNUMA (2012). *GEO 5. Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. ONU. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

- Poblano, J. (2013). *Uso de Briofitas como indicadores atmosféricos de metales pesados en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pollen.com (2016a). Arborvitae (Thuja) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/thuja>.
- Pollen.com (2016b). Ash (Fraxinus) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/fraxinus>.
- Pollen.com (2016c). Cypress (Cupressus) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/cupressus>.
- Pollen.com (2016d). Juniper (Juniperus) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/juniperus>.
- Pollen.com (2016e). Privet (Ligustrum) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/ligustrum>.
- Pollen.com (2016f). Sweet-Gum (Liquidambar) Genus Level details and Allergy Information. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://www.pollen.com/research/genus/liquidambar>.
- Popek, R., Gawrońska, H., Wrochna, M., Gawroński, S. W., & Sæbø, A. (2012). Particulate Matter on Foliage of 13 Woody Species: Deposition on Surfaces and Phytostabilisation in Waxes – a 3-Year Study. *International Journal of Phytoremediation*, 15(3), 245-256. <http://doi.org/10.1080/15226514.2012.694498>.
- ProAire. (2012). *Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Metepec: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Recuperado a partir de http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/69287/8_ProAire_ZMVT.pdf.
- Przybysz, A., Sæbø, A., Hanslin, H., & Gawroński, S. (2014). Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *The Science of the Total Environment*, 481, 360-9. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.072>.
- Querol, X. (2006). El material particulado atmosférico. En *Congreso Nacional del Medio Ambiente* (pp. 1-26). Madrid. Recuperado a partir de http://www.conama8.org/modulodocumentos/documentos/AEs/AE9/AE9_doc_XavierQueroI.pdf
- Quezada, J. (2006). *Emisiones biogénicas a la atmósfera de la zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- RAMA (2015). *Bases de datos meteorológicos registrados en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Octubre-Diciembre 2015*. Metepec: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Información obtenida mediante solicitud de información.

- RAMA (2016a). *Bases de datos de calidad del aire por PM₁₀ y PM_{2.5} registrados en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca 2011-2016*. Metepec: Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. Información obtenida mediante solicitud de información.
- RAMA (2016b). *Mosaico de la Calidad del Aire por Partículas Suspendidas fracción respirable (PM₁₀) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (1998-2016)*. Recuperado a partir de http://rama.edomex.gob.mx/sites/rama.edomex.gob.mx/files/files/RAMA_PDF_MPM10_AB_R16.pdf.
- RAMA (2016c). *Mosaico de la Calidad del Aire por Partículas Suspendidas fracción respirable (PM_{2.5}) en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (2011-2016)*. Recuperado a partir de http://rama.edomex.gob.mx/sites/rama.edomex.gob.mx/files/files/RAMA_PDF_MPM2_5_A_BR16.pdf.
- Reiners, W. (1983). Transport Processes in the Biogeochemical Cycles of Carbon, Nitrogen, Phosphorus, and Sulphur. En B. Bolin & R. Cook (Eds.), *SCOPE 21. The Major Biogeochemical Cycles and Their Interactions*. Recuperado a partir de <http://www.scopenvironment.org/downloadpubs/scope21/chapter05.html>.
- REMA (2016). Estaciones de Muestreo de la Red Mexicana de Aerobiología. Recuperado 25 de mayo de 2016, a partir de http://www.atmosfera.unam.mx/rema/estaciones_muestreo.html.
- Reyes, I. (2010). *Los servicios ambientales de la arborización urbana: retos y aportes para la sustentabilidad de la Ciudad de Toluca*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Robledo, T., Zenteno, E., Agundis, M., Pereyra, M., Calderón, M., & Calderón, M. (2015). Detection of immunogens from *Fraxinus spp.* pollen grains. *Aerobiologia*, 31(3), 403-410. <http://doi.org/10.1007/s10453-015-9373-7>.
- Rodríguez, I., Mohamed, K., Rey, D., Rubio, B., & García, A. (2014). The influence of weather and climate on the reliability of magnetic properties of tree leaves as proxies for air pollution monitoring. *The Science of the total environment*, 468-469, 892-902. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.09.009>.
- Romero, T., & Reyes, L. (2009). Influencia de emisiones naturales y antropogénicas en el material aerotransportado del Valle de Toluca. *Contacto nuclear*, 54, 12-17. Recuperado a partir de [http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/54 Influencia de las emisiones.pdf](http://www.inin.gob.mx/publicaciones/documentospdf/54%20Influencia%20de%20las%20emisiones.pdf).
- Romero, T., Reyes, L., Sandoval, A., & Morelos, J. (2007). Análisis químico-morfológico y evaluación de la distribución de materia particulada en el Valle de Toluca. Memoria del XVII Congreso Técnico Científico ININ-SUTIN 'Dr. Carlos Vélez Ocón' (pp. 1-5).
- Sæbø, A., Popek, R., Nawrot, B., Hanslin, H., Gawronska, H., & Gawronski, S. (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of The Total Environment*, 427, 347-354. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712004883>.
- Sánchez, H. (2012). *Gestión de Áreas Verdes Mediante la Recuperación de Baldíos, caso Ciudad de Toluca, Estado de México*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.

- Sawidis, T., Krystallidis, P., Veros, D., & Chettri, M. (2012). A study of Air Pollution with Heavy Metals in Athens City and Attica Basin using evergreen trees as biological indicators. *Biological Trace Element Research*, 148(3), 396-408. <http://doi.org/10.1007/s12011-012-9378-9>.
- Schreck, E., Foucault, Y., Sarret, G., Sobanska, S., Cécillon, L., Castrec, M., Dumat, C. (2012). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead. *Science of The Total Environment*, 427, 253-262. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969712004123>.
- Secretaría de Ecología GEM (1995). *Los árboles de Toluca* (1.ª ed.). Toluca: Gobierno del Estado de México.
- Secretaría del Medio Ambiente GEM (2007). *Inventario de Emisiones de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca*. Metepec: Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México.
- SEyMEP (2016). Numeralia de Áreas Verdes en el municipio de Toluca 2016. Toluca: Subdirección de Embellecimiento y Mantenimiento del Espacio Público. Dirección de Medio Ambiente y Servicios Públicos. H. Ayuntamiento de Toluca. Información obtenida mediante entrevista personal en mayo de 2016.
- Simon, E., Baranyai, E., Braun, M., Cserhádi, C., Fábrián, I., & Tóthmérész, B. (2014). Elemental concentrations in deposited dust on leaves along an urbanization gradient. *The Science of the total environment*, 490, 514-20. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.028>.
- Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K., & Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. Washington: División de Medio Ambiente del Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Interamericano de Desarrollo.
- Stewart, H., & Scholefield, P. (2016). Emissions database of biogenic isoprene and monoterpene emissions. Recuperado a partir de <http://www.es.lancs.ac.uk/cnhgroup/iso-emissions.pdf>.
- Sun, L., Liao, X., Yan, X., Zhu, G., & Ma, D. (2014). Evaluation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons accumulation in plants from typical industrial sites: potential candidate in phytoremediation for co-contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(21), 12494-12504. <http://doi.org/10.1007/s11356-014-3171-6>.
- Tarback, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física* (8.ª ed.). Madrid: Pearson Educación.
- Tiwary, A., & Colls, J. (2010). *Air Pollution: Measurement, modelling and mitigation* (3ª ed.). New York: Routledge.
- UFEI (2016a). *SelecTree Cupressus sempervirens Tree record 1995-2016*. Recuperado a partir de <https://selectree.calpoly.edu/tree-detail/cupressus-sempervirens>.
- UFEI (2016b). *SelecTree Fraxinus uhdei Tree record 1995-2016*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://selectree.calpoly.edu/tree-detail/fraxinus-uhdei>.
- UFEI (2016c). *SelecTree Ligustrum lucidum Tree record 1995-2016*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://selectree.calpoly.edu/tree-detail/ligustrum-lucidum>.
- UFEI (2016d). *SelecTree Liquidambar styraciflua Tree record 1995-2016*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <https://selectree.calpoly.edu/tree-detail/liquidambar-styraciflua>.

- van den Berg, M., van Poppel, M., van Kamp, I., Andrusaityte, S., Balseviciene, B., Cirach, M., ... Maas, J. (2016). Visiting green space is associated with mental health and vitality: A cross-sectional study in four european cities. *Health & Place*, 38, 8-15. <http://doi.org/10.1016/j.healthplace.2016.01.003>.
- Vázquez, C., Batis, A., Alcocer, M., Gual, M., & Sánchez, C. (1999). *Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación*. Reporte técnico del proyecto CONABIO J084. México D.F. Recuperado a partir de http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/J084_Fichas de Especies.pdf.
- Vecinos Verdes (2016a). Ciprés mediterráneo. *Cupressus sempervirens*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Cupressus sempervirens>.
- Vecinos Verdes (2016b). Fresno. *Fraxinus uhdei*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Fraxinus uhdei>.
- Vecinos Verdes (2016c). Liquidámbar. *Liquidambar styraciflua*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Liquidambar styraciflua>.
- Vecinos Verdes (2016d). Trueno. *Ligustrum lucidum*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Ligustrum lucidum>.
- Vecinos Verdes (2016e). Tulia. *Platycadus orientalis*. Recuperado 24 de mayo de 2016, a partir de <http://www.biodiversidad.gob.mx/Difusion/cienciaCiudadana/urbanos/ficha.php?item=Platycadus orientalis>.
- Versañez, C. (2014). *Estudio del estado y evolución de la cubierta vegetal en Áreas Naturales Protegidas y Áreas Verdes en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca del 2000 al 2008*. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Vlachokostas, C., Achillas, C., Moussiopoulos, N., Kalogeropoulos, K., Sigalas, G., Kalognomou, E., & Banias, G. (2012). Health effects and social costs of particulate and photochemical urban air pollution: a case study for Thessaloniki, Greece. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 5(3), 325-334. <http://doi.org/10.1007/s11869-010-0096-1>.
- Wang, H., Shi, H., & Wang, Y. (2015). Effects of Weather, Time, and Pollution Level on the Amount of Particulate Matter Deposited on leaves of *Ligustrum lucidum*, *The Scientific World Journal*, 2015, 1-8. <http://doi.org/10.1155/2015/935942>.
- Wang, L., Liu, L., Gao, S., Hasi, E., & Wang, Z. (2006). Physicochemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surfaces of urban plants in Beijing. *Journal of Environmental Sciences*, 18(5), 921-926. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074206600156>.

- Weber, F., Kowarik, I., & Säumel, I. (2014). Herbaceous plants as filters: immobilization of particulates along urban street corridors. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 186, 234-40. <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.011>.
- WHO (1980). *Glossary on air pollution. WHO regional publications European series*. Dinamarca: World Health Organization. Regional Office for Europe. Recuperado a partir de <http://www.euro.who.int/document/WA15.pdf>\n<http://www.euro.who.int/document/WA15G.pdf>
- WHO (2000). Particulate matter. En *WHO Air Quality Guidelines for Europe (CD-ROM version)* (2.^a ed., pp. 1-40). Copenhagen. Recuperado a partir de http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0019/123085/AQG2ndEd_7_3Particulate-matter.pdf?ua=1
- WHO (2006). *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution*. Dinamarca: World Health Organization.
- WHO (2013). *Health Effects of Particulate Matter: Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*. Dinamarca: World Health Organization.
- WHO (2014). *Burden of disease from Ambient Air Pollution for 2012*. Geneva: World Health Organization. Recuperado a partir de http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/.
- World Allergy Organization (2011). *White Book on Allergy*. (R. Pawankar, G. W. Canonica, S. T. Holgate, & R. F. Lockey, Eds.) *World Allergy Organization (WAO) White Book on Allergy* (1.^a ed.). Milwaukee, Wisconsin. <http://doi.org/10.1080/14693062.2006.9685626>.
- Xie, R., Seip, H., Leinum, J., Winje, T., & Xiao, J. (2005). Chemical characterization of individual particles (PM₁₀) from ambient air in Guiyang City, China. *The Science of the total environment*, 343(1-3), 261-72. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.10.012>.
- Yang, J., McBride, J., Zhou, J., & Sun, Z. (2005). The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban Forestry & Urban Greening*, 3(2), 65-78. Recuperado a partir de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866704000226>.
- Yang, L., Zhang, L., Li, Y., & Wu, S. (2015). Water-related ecosystem services provided by urban green space: A case study in Yixing City (China). *Landscape and Urban Planning*, 136, 40-51. <http://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.11.016>.
- Zamudio, S., & Carranza, E. (1994, septiembre). Cupressaceae. *Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*, 1-20. Recuperado a partir de [http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/Flora 29.pdf](http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/Flora%2029.pdf).
- Zhang, B., Xie, G., Zhang, C., & Zhang, J. (2012). The economic benefits of rainwater-runoff reduction by urban green spaces: a case study in Beijing, China. *Journal of environmental management*, 100, 65-71. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.015>.

ANEXO 1

Depósito seco obtenido y ubicación de los ejemplares muestreados

Ejemplar	Depósito seco gr kg ⁻¹	UTM X	UTM Y	Referencia de ubicación
AL1-244-LQ	0.9720	430523	2133058	SuperKompras sobre el parque
VG1-261-LQ	0.9840	428948	2132785	Esquina en el centro del camellón triangular
VG1-260-FU	1.1900	428977	2132783	Esquina Morelos, junto a letrero de bando municipal
VG1-263-FU	1.2620	429147	2132782	Atrás de Ligustrum 262
VG1-255-LQ	1.3160	429093	2132533	Junto a jardinera con rosas
VG1-265-CS	1.4420	429084	2132784	Frente a casa blanca
VG1-258-LQ	1.4940	429080	2132605	Frente a cancha de basketball
AL1-251-ID	1.5400	430385	2132990	Frente a la parte trasera del IMCUFIDET pintado de blanco
CU1-270-CS	1.6100	428528	2132172	Rumbo a Zinacantepec, 1° pasando puerta G de Ciudad Universitaria
AL1-247-LL	1.6300	430517	2133136	Frente a entrada principal del Ex-Hospital ISSEMyM
AL1-249-LL	1.6860	430371	2133113	Frente a cajero de Banamex
VG1-257-LL	1.7980	429069	2132607	Junto a escalera de cancha de basketball
VG1-262-LL	1.8940	429147	2132781	Inicio de Morelos; ejemplar torcido
AL1-246-FU	1.9300	430537	2133125	Junto a kiosko de periódicos crecano al ExHospital ISSEMyM
AL1-250-FU	1.9380	430381	2133025	Por bancas sobre calle Quintana Roo, frente a IMCUFIDET
AL1-253-ID	1.9940	430429	2132975	Frente a Hotel Cazadores
TA1-226-LQ	2.1320	433639	2132407	Esquina del OXXO junto a teléfono público.
IM1-278-LQ	2.2440	432621	2132149	Frente a pilar naranja del puente, junto a Walmart
VG1-256-LL	2.2960	429094	2132539	Junto a punto 255
AL1-245-LQ	2.3800	430533	2133109	Junto a lonchería "El Álamo"
AL1-252-ID	2.4380	430395	2132971	Frente a Plaza Carlos Gómez, casi frente a restaurante "La Gloria"
CU1-271-CS	2.4800	428836	2131859	Junto a cámara de vigilancia de esq. Paseo universidad
AL1-254-FU	2.5360	430458	2132971	Frente a oficina de Huizi
AL1-248-LL	2.5520	430391	2133173	Frente a oficina de ventas del Paseo Molino
JR1-205-LL	2.7620	432618	2133134	Frente a escuela Concordia

Sitio	
VG	Vicente Guerrero
AL	Alameda
CU	Tollocan CU
JU	Juárez
PC	Paseo Colón
OD	Odontología
JR	Jardín Reforma
TA	Tablajeros
IM	IMSS
MA	Maquinita

Especie
Familia Cupressaceae (cipreses, enebros)
<i>Fraxinus uhdei</i> (fresno)
<i>Ligustrum lucidum</i> (trueno)
<i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar)

FUENTE: Elaboración propia.

***En esta página se muestran ejemplares con un depósito seco $\leq 5 \text{ g kg}^{-1}$**

Continúa en la siguiente página...

Depósito seco obtenido y ubicación de los ejemplares muestreados

[Continuación de la página anterior]

Ejemplar	Depósito seco gr kg ⁻¹	UTM X	UTM Y	Referencia de ubicación
JR1-209-FU	2.9380	432561	2133250	Letrero, por la escuela
JU1-234-LQ	3.0520	431271	2132684	Frente a Soriana, Fuera de "Salvaje tentación" y "Supersoya"
JU1-227-CS	3.1740	431221	2133318	Frente a tortería "Capri"
VG1-259-FU	3.3860	429003	2132737	Frente a Fac. Geografía
JR1-202-LL	3.4260	432623	2133182	Frente a "Baños Victoria"
OD1-242-TU	3.4720	430928	2131162	Entre poste y punto 239
VG1-266-ID	3.6360	428920	2132818	Esquina en el centro de camellón triangular
PC1-284-LQ	3.7000	430613	2130943	Anuncios Tecmilenio color azul marino
CU1-268-FU	3.7060	428493	2132443	Junto a anuncio Paseo Tollocan
IM1-273-LQ	3.7340	432707	2132270	Fuera de clínica IMSS, pasando puente
JR1-204-LL	3.8260	432557	2133191	Frente a tienda que está junto a la papelería
JU1-229-LQ	3.8260	431250	2132973	Justo a la salida de "Electra"
IM1-277-LQ	3.8520	432684	2132226	Jardín casi terminando IMSS. Frente a oficinas "Diario amanecer"
TA1-221-LL	3.9200	433605	2132437	Frente a puente naranja.
MA1-60-LL	3.9520	432354	2134754	Bajo el puente, en camellón. Frente a álamo y el suelo tiene rocas.
OD1-241-TU	3.9840	430895	2131166	Segundo árbol hacia Terminal; junto a Ficus pequeño
OD1-237-LL	4.1360	430867	2131177	Segundo árbol a partir de la esquina de Odontología
CU1-269-FU	4.1920	428520	2132169	Casi frente a puerta G; junto a sauce grande
TA1-220-ID	4.2280	433588	2132423	Paradas con mampara. Frente a vivero
AL1-243-LQ	4.2780	430527	2132997	Museo de la acuarela
JU1-231-LQ	4.3140	431245	2132784	Fuera de "Salvaje Tentación"
TA1-219-LL	4.4160	433547	2132427	Junto a jacaranda, frente a "McDonalds" y una yuca
VG1-264-CS	4.4980	429104	2132781	Sobre Morelos, tras una pista de correr del parque
CU1-272-FU	4.6180	428844	2131878	Esquina Paseo universidad
OD1-239-LL	4.7960	430927	2131168	Junto a poste, cerca de la parte trasera de un letrero azul que dice CU

Sitio	
VG	Vicente Guerrero
AL	Alameda
CU	Tollocan CU
JU	Juárez
PC	Paseo Colón
OD	Odontología
JR	Jardín Reforma
TA	Tablajeros
IM	IMSS
MA	Maquinita

Especie
Familia Cupressaceae (cipreses, enebros)
<i>Fraxinus uhdei</i> (fresno)
<i>Ligustrum lucidum</i> (trueno)
<i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar)

FUENTE: Elaboración propia.

***En esta página se muestran ejemplares con un depósito seco <5 g kg⁻¹**

Continúa en la siguiente página...

Depósito seco obtenido y ubicación de los ejemplares muestreados

[Continuación de la página anterior]

Ejemplar	Depósito seco gr kg ⁻¹	UTM X	UTM Y	Referencia de ubicación
TA1-212-ID	5.4000	433641	2132495	Esquina al lado de los puentes
TA1-225-LQ	5.5020	433633	2132381	Frente a tienda de dulces por mayoreo
JR1-210-CS	5.6040	432540	2133177	Casa verde 2013
JR1-206-FU	5.7360	432540	2133126	En un baldío, cercado
TA1-211-FU	5.7980	433654	2132492	Esquina frente a "Xalta pinturas"
PC1-285-FU	6.1140	430643	2131086	Junto a capulín, cerca del DIF
TA1-213-ID	6.2360	433614	2132465	Esquina bajo el puente naranja frente a "Mc Donalds"
PC1-286-LQ	6.3860	430645	2131140	2° viniendo de glorieta de Colón
PC1-283-FU	6.4420	430621	2130917	Frente a estacionamiento Colón y casa 451
JU1-228-CS	6.4780	431231	2133221	Frente a "Candy Factory"; misma acera
JU1-230-CS	6.6180	431252	2132964	Fuera de "Mil luces" frente a "Electra"
TA1-218-LL	6.7460	433568	2132447	Entre 2 colorines, frente a teléfono público y torre de luz
MA1-61-LL	6.8440	432373	2134874	Esquina; junto al puesto de revistas por donde pasa el tren.
MA1-59-LL	7.0720	432390	2134846	Frente a vías del tren. Acera de Fac. Ciencias de la Conducta
JU1-232-LL	7.0720	431247	2132792	Fuera de "Eleccion"
PC1-282-LQ	7.1420	430600	2130862	Camellón esquina Colón y Gral. A. Obregón
JU1-236-LL	7.3420	431254	2132771	Fuera de "Todo rock", junto a estacionamiento público
JR1-208-LL	7.9080	432558	2133099	Fuera de Refaccionaria
JU1-233-LL	8.0680	431260	2132705	Fuera de "Grand Plaza", frente a "Fonix Telcel"
TA1-224-LQ	8.1160	433647	2132443	Esquina de loseta vinílica junto a poste de madera
IM1-274-FU	8.2160	432697	2132265	Junto a punto 233
MA1-58-CS	9.1980	432343	2134807	Frente a "La Maquinita" y vías del tren; junto a una cruz y un fresno

Sitio	
VG	Vicente Guerrero
AL	Alameda
CU	Tollocan CU
JU	Juárez
PC	Paseo Colón
OD	Odontología
JR	Jardín Reforma
TA	Tablajeros
IM	IMSS
MA	Maquinita

Especie
Familia Cupressaceae (cipreses, enebros)
<i>Fraxinus uhdei</i> (fresno)
<i>Ligustrum lucidum</i> (trueno)
<i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar)

FUENTE: Elaboración propia.

***En esta página se muestran ejemplares con un depósito seco entre 5 y 10 g kg⁻¹**

Continúa en la siguiente página...

Depósito seco obtenido y ubicación de los ejemplares muestreados

[Continuación de la página anterior]

Ejemplar	Depósito seco gr kg ⁻¹	UTM X	UTM Y	Referencia de ubicación
OD1-240-TU	10.0400	430859	2131173	Frente a punto 237
CU1-267-CS	10.6700	428506	2132431	Frente a "Minicar Tollocan", entre sauce y cedro blanco
OD1-238-LL	12.1340	430891	2131167	Junto a poste de metal verde; se ve un Ficus
IM1-276-FU	14.1680	432688	2132236	Jardín casi terminando IMSS. Frente a oficinas de "Diario Amanecer"
TA1-223-FU	14.1960	433628	2132431	Esquina frente a Iglesia adventista y OXXO
IM1-279-CS	14.6340	432654	2132193	Más alejado de la terminal, frente a Walmart
IM1-281-CS	15.5660	432648	2132177	1° frente a Walmart, viniendo de la terminal
MA1-56-CS	15.9140	432260	2134841	Esquina prepa 3, sobre camellón; ISES frente a teléfono público.
TA1-222-FU	16.3780	433635	2132452	Esquina; señalética de gasolinera a 200 m
MA1-53-ID	16.7300	432278	2134828	Esquina junto a pino
MA1-55-ID	20.1020	432283	2134908	Más esquinado del camellón; fuera de portón de ISES.
JR1-207-CS	21.2440	432549	2133124	Fuera de florería "Laryleth"
IM1-280-CS	23.2240	432649	2132180	Entre puntos 279 y 281

Sitio	
VG	Vicente Guerrero
AL	Alameda
CU	Tollocan CU
JU	Juárez
PC	Paseo Colón
OD	Odontología
JR	Jardín Reforma
TA	Tablajeros
IM	IMSS
MA	Maquinita

Especie
Familia Cupressaceae (cipreses, enebros)
<i>Fraxinus uhdei</i> (fresno)
<i>Ligustrum lucidum</i> (trueno)
<i>Liquidambar styraciflua</i> (liquidámbar)

FUENTE: Elaboración propia.

***En esta página se muestran ejemplares con un depósito seco ≥ 10 g kg⁻¹**

Si usted desea tener acceso a la base de datos, capas de información vectorial, así como resolver dudas respecto a la metodología y resultados obtenidos, sírvase de contactar al autor a través de la dirección de correo electrónico arturo.mthe@gmail.com