



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

Depósito de material particulado en follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh en el Valle de México

LUZ AMELIA SÁNCHEZ LANDERO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

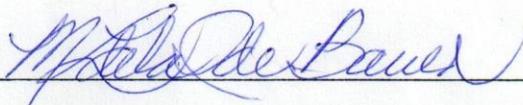
La presente tesis titulada: "**Depósito de material particulado en follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh en el Valle de México**", realizada por la alumna: **Luz Amelia Sánchez Landero** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

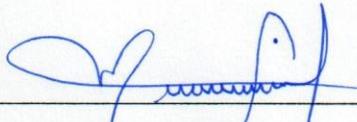
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DRA. MARIA DE LOURDES DE LA ISLA SERRANO

DIRECTOR DE TESIS



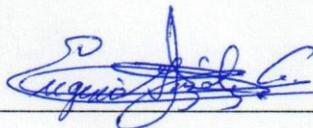
DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR



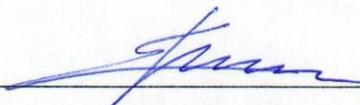
DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

ASESOR



DR. EUGENIO GONZÁLEZ AVALOS

ASESOR



DRA. EUGENIA JUDITH OLGÚN PALACIOS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2015.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo a través de la beca para realizar mis estudios de Doctorado.

Al Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, por la oportunidad de realizar esta meta académica.

Al Dr. Miguel Ángel López Lòpez, quien dedicó tiempo, esfuerzo y paciencia. Gracias por sus sabios consejos, enseñanzas no solo profesionales, sino como ser humano y por la oportunidad de trabajar con usted este proyecto académico y de vida, siempre le estaré agradecida por todo el interés a este trabajo, su invaluable tiempo y la oportunidad de aprender de usted como profesor y como ser humano. Con respeto y admiración espero que siempre siga siendo el buen profesor que es.

A la Dra. María de Lourdes de la Isla de Bauer, por el apoyo a este trabajo y las facilidades para realizar esta investigación.

Al Dr. Armando Gómez Guerrero, por su asesoría, disponibilidad y consejos y valiosas observaciones para lograr este trabajo.

Al Dr. Eugenio González Avalos, por su asesoría comentarios al trabajo y disponibilidad para la culminación del presente.

A la Dra. Eugenia Olguín Palacios por sus recomendaciones, e interés en este tema y por el apoyo otorgado para finalizar.

Al Dr. Tomás Hernández Tejeda por sus recomendaciones, sugerencias y revisiones para culminar este trabajo.

A la Mtra. Yesenia Zavaleta Sánchez por su apoyo incondicional y excelentes asesorías en la sección estadística, quien aun no siendo parte de este consejo, siempre mostró interés y disponibilidad para realizar este trabajo.

Al Dr. Sergio Hernández González por su apoyo y excelente asesoría Estadística al inicio de este trabajo.

Al Biól. Julio Cesar por sus consejos, recomendaciones, revisiones apoyo e interés por este trabajo.

Al Personal de Hidrociencias en especial al **Dr. Héctor Flores Magdaleno**, al **Sr. Cruz Frutero** e **Irene Osorio**, por el apoyo y las facilidades otorgadas a lo largo de este proceso.

Al Dr. Víctor Manuel Cetina Alcalá, por las facilidades otorgadas de su invernadero para secar las muestras de suelo.

Al Sr. Manuel Barrera Sánchez, por su valioso apoyo en las colectas y mediciones en campo.

A las autoridades responsables del Parque Naucalli y los **Bosques Chapultepec y Tlalpan** por las facilidades otorgadas para la toma de muestras.

DEDICATORIA

A Dios, por estar presente en mi vida aun cuando yo no siempre lo recuerdo, por todas las maravillosas bendiciones con las que ha llenado mi vida siempre y que han ido en aumento. Gracias señor por no soltarme de tu mano, guiar mis pasos y llevarme a tomar decisiones acertadas o equivocadas porque de todas ellas he aprendido siempre, nunca dejes de brillar en mi vida.

A mi esposo Julio César cómplice mejor amigo y ahora compañero de vida, a quien debo muchos de los momentos más felices y maravillosos que he tenido hasta hoy. Gracias por la oportunidad de vivir todas estas aventuras juntos como novios y ahora como esposos, espero gozar a tu lado todo lo que me reste de existencia, es todo un honor estar a tu lado pues tu compañía, tu apoyo y tu confianza en mí, me inspiran a querer ser mejor y a desear pasar toda la vida a tu lado, Simplemente Te amo.

A mi papá Porfirio Sánchez Galván (†) a quien aun después de faltar desde hace muchos años recordamos con mucho cariño y amor, tú fuiste mi primer motor e inspiración de vida profesional, hasta hoy he tratado de cumplir nuestro acuerdo y espero desde donde estés te sientas satisfecho por esa semillita que sembraste en mí, te quiero papá.

A mi mamá Linda Landero Morales, por ser la más linda de todas las mujeres que hay en mi vida, por todo ese amor, entrega, lucha y sacrificio que siempre has tenido para nosotros, *todos y cada uno de mis logros son tuyos mami porque tú has puesto lágrimas y esfuerzo para que salgamos adelante*, Dios te bendiga por todo ese inmenso amor de madre y por todo lo que nos das. Te amo con todo mi corazón.

A mis hermanos Gabriel y Beto, por su apoyo, cariño y confianza en mí por ser mi pilar e inspiración para muchas cosas los amo hermanitos.

A mis bellos sobrinos Grecia, Axel, Christopher y Beto por ser la alegría de nuestra familia y reafirmar con su presencia las bendiciones que recibimos, mis niños aún son muy pequeños y les falta un largo camino por recorrer pero nunca desistan para alcanzar sus metas y objetivos, den su mejor esfuerzo ante la vida y como decía su abuelo estudien y prepárense para ser fuertes e independientes ante todo. Que Dios siempre los guíe y los acompañe por el buen camino.

A mis tíos Gerardo y María del Carmen, así como a mis **primas casi hermanas Janelys y Jenny**, por su apoyo incondicional, su cariño y por estar siempre pendientes de mí, los quiero.

A mi abuelita Ely, así como a mis tíos: **América, Maleno, Cristy, Claudia y Elsy** y mis **primos: Mauricio, Margarita, Jorge, Feliciano, Alfonso y Alejandro**, porque siempre cuento con su cariño y ánimos.

A mi ahora **familia política** quien a lo largo de los años que tengo de conocerlos siempre me ha demostrado cariño y aprecio mis **suegros Sra. Ángela y Sr. Julio** así como a mis **cuñados Marco y Susana** y mi **sobrina Kristal**.

A mis amigos incondicionales de siempre y de años: **Maru, Lupita, Ana Lilia, Isaac, Paco, Reyna, Mónica, Marisol, Yanet, Sofía, Jorge Alejandro, Alejandro del Pino y Luis Alfredo**. Gracias queridos amigos por la amistad, el apoyo y el cariño a lo largo de este tiempo, espero seguir contando con su amistad por el resto de mi vida.

A mis queridos amigos del Colegio: Ana Laura, Ahmed, Chely, Arturo, José María Mitzi, José Luis y Raúl. Ustedes me regalaron gratos momentos. En especial Ana Laura gracias por tú cariño, apoyo incondicional y amistad y por ser la maravillosa persona que eres.

A la familia Bautista Olivas por la confianza, el cariño y el apoyo. En especial a la Sra. Carmen mil gracias por todo, no tengo palabras para expresarle mi gratitud, es usted una gran persona.

A mis amigos que conocí en momentos importantes de mi vida: Mireya, Claudia Iveth, Nancy, Vane, Noé, Arturo, Maricarmen, Memo, Irma Guerra y Alejandro Guerrero. La oportunidad de conocerlos y de aun conservar su amistad sigue siendo muy valiosa para mí, espero que en algún momento de la vida volvamos a coincidir.

A mis amigas las corredoras Yess, Zeny, Guille, Alma, Judith, Rubí, Nidia y Martha a quienes quiero, admiro y aprecio, ustedes son claro ejemplo de mujeres inteligentes, guapas, sencillas y agradables; gracias por compartir su amistad conmigo, espero que perdure para siempre y que sigamos compartiendo muchos kilómetros y experiencias de vida juntas, las quiero.

Al profe Mario Celis por estar ahí todos los días mostrándonos que solo esforzándose diariamente podemos lograr nuestra meta. *Gracias por hacernos creer que podemos dar más.* Y también a la **Señora Carmen y Lázaro** por los ánimos, apoyo y su amistad.

A mis compañeros de la SEV, Mago, Rosy, Fer, Sol, Mary, Ivonne, Raquel, Tere y Luis por los ánimos y el apoyo. Ha sido una bonita experiencia y novedosa para mí compartir este momento de mi vida con ustedes, me alegra haber tenido el gusto de conocerlos.

Y a todas aquellas personas que han formado parte de mi vida y que han hecho un poco de lo que hoy soy. Y a todas aquellas que aún no están en ella pero que llegaran a ser una parte especial más de mí.

**Depósito de material particulado en el follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh
en el Valle de México.**

Luz Amelia Sánchez Landero, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2015.

RESUMEN GENERAL

Diversos estudios sobre contaminantes atmosféricos han demostrado que estos tienen efectos negativos sobre la vegetación urbana, la cual juega un papel importante interceptándolos. Sin embargo, no existen estudios que relacionen el impacto del material particulado sobre la vegetación urbana de la Zona Metropolitana del Valle de México, por lo que el objetivo general de este trabajo fue cuantificar la concentración superficial e intracelular de cobre, zinc, plomo, níquel, cromo, cobalto y cadmio en el follaje de árboles de la especie *Fraxinus uhdei*, (Wenz.) Lingelsh del parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan, conocer su distribución temporal y espacial, así como evaluar los efectos que tienen sobre el follaje y el crecimiento de los árboles. El presente trabajo se realizó durante el otoño e invierno del 2011 y primavera y verano del 2012, se colectó follaje de 45 árboles y se registraron las variables de diámetro a la altura del pecho, área foliar, área foliar específica y peso seco de hojas y se obtuvieron la dirección y velocidad del viento con datos de estaciones meteorológicas. Con las concentraciones obtenidas se realizaron pruebas de análisis de varianza con las fuentes de variación bosques y época estacional; prueba t student entre la concentración intracelular y la superficial, modelos de regresión múltiple para determinar si existe algún efecto sobre el follaje y el crecimiento de los árboles. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Minitab® 14. Los resultados muestran que los depósitos superficiales son mayores que los intracelulares, excepto níquel. El bosque de Chapultepec mostró las concentraciones más altas de plomo y cadmio y estas aumentan en la época invernal. Se encontró que el cobre, zinc y cromo tienen efectos tanto negativos como positivos en el follaje y el crecimiento de los árboles según el bosque y la época del año.

Palabras clave: contaminación ambiental, *Fraxinus uhdei*, metales pesados.

STORAGE OF PARTICULATE IN FOLIAGE *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingel IN THE VALLEY OF MEXICO

Luz Amelia Sánchez Landero, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2015.

ABSTRACT

Several studies on atmospheric pollution have proven that they have negative effect on the urban vegetation, which plays an important role by blocking them. Nevertheless, there are not studies which connect the impact of particle matter on the urban vegetation in the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico. Due to this, the general objective of this work was to quantify the superficial and intracellular concentration of copper, zinc, lead, nickel, chromium, cobalt and cadmium on the foliage of the tree species *Fraxinus uhdei*, (Wenz.) Lingelsh in Naucalli Park and Chapultepec and Tlalpan Forests, to know the seasonal and spatial distribution, and to evaluate the effects on the foliage and the tree growth. The present work was carried out during the autumn and winter of 2011 and spring and summer of 2012, the foliage of 45 tree was collected and the variable of diameter to chest height, foliar area, specific foliar area and leaf dry weight were registered. The wind direction and velocity were obtained with meteorological stations data. With the obtained concentrations, variance analysis tests were carried out with the variance source of forest and season; t student test between the the superficial and intracellular concentration, multiple regression models to determine if there is some effect on foliage and tree grow. All statistical analysis were carried out with Minitab® 14 program. The results show that the superficial deposits were higher that intracellular ones, with the exception of nickel. The Chapultepec Forest show the highest concentrations of lead and cadmium and they increase during winter. It was found that copper, zinc and chromium also have negative and positive effects in foliage and the tree grow depending on the forest and the season.

Key words: environmental pollution, *Fraxinus uhdei*, heavy metals

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA.....	v
RESUMEN GENERAL	viii
ABSTRACT	ix
CONTENIDO.....	x
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. Objetivos	3
3. Hipótesis	4
4. Revisión de literatura	4
5. Literatura citada	12
CAPÍTULO I. CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL E INTRACELULAR DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS EN FOLLAJE DE BOSQUES URBANOS DEL VALLE DE MÉXICO.	16
1.1 Resumen.....	16
1.2 Abstract.....	18
1.3 Introducción	20
1.4 Materiales y métodos.....	22
1.5 Resultados y Discusión.....	28
1.6 Conclusiones	46
1.7 Literatura citada	47
CAPÍTULO 2. DIÁMETRO DEL TRONCO Y ÁREA FOLIAR DE <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) EN RESPUESTA A DEPÓSITOS SUPERFICIALES E INTRACELULARES DE PARTÍCULAS ATMÓSFERICAS EN BOSQUES URBANOS DEL VALLE DE MÉXICO.	52
2.1 Resumen.....	52

2.2 Abstract.....	54
2.3 Introducción	56
2.4 Materiales y Métodos	57
2.5 Resultados y discusión	62
2.6 Conclusiones	75
2.7 Literatura citada	76
CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS	82
ANEXOS	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1-1. Concentraciones superficiales e intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr Y Cd en follaje de <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) en bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México.....	29
Cuadro 1-2. Concentraciones superficiales e intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr Y Cd en hojas de <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) en Parque Naucalli y los Bosques de Chapultepec y Tlalpan.....	30
Cuadro 1-3. Concentraciones promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd depositadas sobre hojas de <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) en cuatro estaciones del año.	33
Cuadro 1-4. Correlaciones entre las concentraciones superficiales de las partículas Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd de árboles muestreados y la distancia más corta a las principales avenidas que los rodean.	38
Cuadro 2-1. Concentraciones promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd depositadas sobre hojas de <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) en las cuatro estaciones del año para el Parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.	63

Cuadro 2-2. Cambios encontrados para el área foliar de 100 hojas por bosque y época estacional.	67
Cuadro 2-3. Relaciones entre el área foliar específica de 100 hojas por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.....	68
Cuadro 2-4. Relaciones entre peso seco de 100 hojas por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.....	69
Cuadro 2-5. Relaciones entre incremento en diámetro, por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.....	70
Cuadro 2-6. Comparación estadística (prueba de Kruskall wallis) para las variables área foliar (AF), área foliar específica (AFE) y peso seco de 100 hojas (PS) e incremento en diámetro (ΔD) de <i>Fraxinus uhdei</i> (Wenz.) para el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación del área de estudio	23
Figura 1.2. Ubicación geográfica de los árboles muestreados y principales avenidas aledañas.....	25
Figura 1.3. Dirección y velocidad del viento para el parque Naucalli.	39
Figura 1.4. Dirección y velocidad del viento para el Bosque de Chapultepec.....	40
Figura 1.5. Dirección y velocidad del viento para el Bosque de Tlalpan.	41
Figura 1.6. Concentraciones de Partículas suspendidas en el aire de tamaño PM ₁₀ obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México cercanas al Parque Nacualli y los bosque Chapultepec y Tlalpan.....	42
Figura 1.7. Concentraciones de Partículas suspendidas en el aire de Pb obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de México cercanas al Parque Nacualli y los bosque Chapultepec y Tlalpan.....	43

Figura 1.8. Precipitación promedio anual para el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan, periodo otoño invierno 2011 y primavera y verano 2012.	44
Figura 1.9. Concentraciones a) superficiales y b) intracelulares promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, y Cd. en Parque Naucalli y los Bosques Chapultepec y Tlalpan, y concentraciones c) superficiales y d) intracelulares de los mismos contaminantes en las cuatro estaciones del año.	45
Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.	58
Figura 2.2. Concentraciones de Partículas suspendidas en el aire de tamaño PM ₁₀ obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México cercanas al Parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.	423
Figura 2.3. Nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio del peso seco de 100 hojas en el parque Naucalli (N) y los bosques Chapultepec (Ch) y Tlalpan (T).	74

INTRODUCCIÓN GENERAL

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es uno de los lugares más contaminados del mundo con una mala calidad de aire, sin embargo, como bien han señalado Molina y Molina (2004), existen esfuerzos importantes que continúan a través de enfoques interdisciplinarios para comprender y finalmente, en gran medida disminuir los impactos que ocasiona la contaminación.

La cuenca del Valle de México, situada a una altitud de 2,240 msnm se encuentra rodeada por una cadena montañosa integrada por las formaciones de la Sierra de Monte Bajo, Sierra de las Cruces, Sierra del Chichinautzin, Sierra Nevada y Sierra del Río Frío. La cadena montañosa alcanza su nivel más alto hacia el oriente con más de 5,000 m, mientras que en el norte la altura máxima es de 3,000 m. Debido a la altitud, el contenido de oxígeno del aire de la ZMVM es aproximadamente 23% menor que al nivel del mar, lo que contribuye a que los procesos de combustión sean menos eficientes y emitan una mayor cantidad de contaminantes (SMA, 2008).

El entorno montañoso que rodea al Valle de México, constituye una barrera natural que dificulta la libre circulación del viento y la dispersión de los contaminantes. Por su altitud, frecuentemente ocurren inversiones térmicas en el Valle, que es un fenómeno natural que causa un estancamiento temporal de las masas de aire frío sobre la superficie de la tierra. El estancamiento perdura hasta que, al transcurrir el día, la inversión térmica se rompe debido al calentamiento de la atmósfera, entonces los contaminantes se dispersan. (SIMAT, 2006).

Asimismo, el tráfico que se genera por los vehículos automotores en las grandes centros urbanos como la ZMVM es la principal fuente de contaminación aérea, que contribuye con aproximadamente un 57-75% del total de emisiones (WHO, 2006).

La calidad al aire en la ZMVM es considerada como uno de los principales objetos de preocupación a los que se enfrentan sus habitantes, ya que es uno de los núcleos urbanos con mayor población a nivel mundial. La elevada concentración de industrias, vehículos de combustión interna y el uso doméstico de la energía provocan el deterioro de la calidad del aire (Escobedo y Chacalo, 2008).

El material particulado en la atmósfera, denominado PM_{10} son partículas de diámetro aerodinámico igual o menor a $10\mu m$. Estas partículas impactan en el medio ambiente, ya que sirven de catalizadores sobre superficies metálicas, favoreciendo su oxidación además de contener compuesto como el sulfato de amonio $[(NH_4)_2SO_4]$ y el nitrato de amonio NH_4NO_3 , los cuales reaccionan con la humedad formando lluvia ácida (Parungo *et al.*, 1987). Las PM_{10} y $PM_{2.5}$ se consideran perjudiciales para la salud y su efecto depende de la composición química que éstas tengan (Vázquez-Cruz, 2009).

Actualmente se sabe que los bosques y árboles en ambientes urbanos pueden mejorar la calidad del aire a través de la filtración y la captura de gases y partículas (Pourkhabbaz *et al.*, 2010). Las partículas que se depositan sobre la vegetación urbana, dañan a las hojas de las plantas, afectan el crecimiento y limitan su productividad, según la sensibilidad que tengan a los contaminantes (St. Clair *et al.*, 2002); pueden ocasionar clorosis, necrosis y epinastia (Katiyar y Dubey, 2000), además de una disminución del contenido de clorofila y aumento en el contenido de ácido ascórbico, el cual es un antioxidante y neutraliza los oxidantes naturales de las hojas (Alcalá *et al.*, 2008b).

Los árboles son captadores de gases y partículas, promoviendo con eso la mejora en la calidad del aire (Beckett *et al.*, 1998, 2000), actúan como sumideros de contaminantes y reducen su concentración en el aire. Todo esto según la capacidad de intercepción del polvo en las plantas, lo cual depende de la geometría de su superficie, y de las

características externas de la hoja como pelos, cutícula, altura, y arquitectura de la copa de los árboles (Alcalá *et al.*, 2008a).

El propósito de este trabajo fue determinar las concentraciones intracelulares y los depósitos superficiales de contaminantes (metales) sobre el follaje de la especie *Fraxinus uhdei* (Wenz.) reportada como muy utilizada para la reforestación urbana en la ciudad de México (Benavides *et al.*, 2002).

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

- Determinar las concentraciones superficiales e intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd en tres bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México; así como la distribución espacial y temporal de éstos elementos sobre el follaje y el posible efecto sobre el crecimiento de árboles de *Fraxinus uhdei* (Wenz.)

2.2 Objetivos específicos

- Determinar la tendencia de los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd durante las 4 épocas estacionales del año.
- Analizar el efecto que tiene el depósito superficial y la concentración intracelular de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd sobre el follaje, según la distancia de los árboles con respecto a las avenidas que los rodean.
- Realizar una comparación entre los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares.
- Relacionar el efecto que tienen sobre el incremento del diámetro, área foliar, área foliar específica y peso seco de hojas los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd.

- Comparar las variables área foliar, área foliar específica, peso seco de hojas e incremento en diámetro entre bosques
- Comparar el estado nutrimental de N, P y K entre los bosques urbanos estudiados.

3. Hipótesis

H0: Los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd del follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) de tres bosques urbanos de la ZMVM no presenta variación espacial, temporal, ni efectos sobre el crecimiento de los árboles.

Ha: Los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares de al menos uno o algunos de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd del follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) de tres bosques urbanos de la ZMVM tienen variación espacial, temporal y efectos sobre el crecimiento de los árboles.

4. Revisión de literatura

La contaminación del aire es ocasionada tanto por procesos naturales como industriales, que producen gases y partículas líquidas o sólidas en suspensión, que son una mezcla de sustancias de origen natural (cenizas volcánicas, polen, bacterias, virus, esporas de hongos, polvos, etc.), arrastradas por los vientos y por los humos provocados artificialmente por el hombre, como los producidos por la combustión (Conner *et al.*, 2001). Las partículas pueden ser sólidas o líquidas, están suspendidas y pueden ser dispersadas por el aire. Sus propiedades varían en términos de su composición química, morfología (tamaño y forma), parámetros ópticos (color, dispersión, absorción e índice de refracción de la luz) y características eléctricas (carga, resistencia) (Marcazzan *et al.*, 2003).

Los contaminantes en partículas no son químicamente uniformes, sino más bien entran en una amplia variedad de tamaños, formas y composiciones químicas (Marcazzan *et al.*, 2003). Aunque pocas de las partículas suspendidas en el aire son de forma exactamente esférica, es conveniente y convencional, por simplicidad, considerar como si todas ellas lo fueran. De hecho, el diámetro aerodinámico de las partículas atmosféricas, que está relacionado con su masa y velocidad de sedimentación es importante, y a partir de esto se clasifican como PM₁₀ a las partículas con diámetros iguales o inferiores a 10 µm y PM_{2.5} a las partículas con diámetros iguales o inferiores de 2.5 µm. Cualitativamente, las partículas individuales se clasifican como gruesas, finas, y ultra finas, dependiendo de que sus diámetros sean mayores o menores a 2.5 µm, y menores a 100 nm respectivamente (Campos *et al.*, 2007).

Las PM₁₀ generalmente son producto de la combustión de materiales fósiles o de procesos industriales en los que se trabaja con altas temperaturas que generan condensación de gases, humos y vapores (Marcazzan *et al.*, 2003). Las partículas que miden 10 µm o más (gruesas), resultan principalmente de procesos mecánicos como la abrasión o fricción, son predominantemente de origen natural o geológico (óxidos de aluminio, silicón, calcio, titanio y hierro), y se agrupan entre éstas las esporas, el polen, suelos, partículas de hojas, polvos generados por el tráfico o producto del desgaste de las llantas y partículas de emisiones industriales como fábricas de cemento y blocks. En la superficie de estas partículas pueden adsorberse otras especies contaminantes (Conner *et al.*, 2001). Las partículas menores de 2.5 µm (finas), están formadas principalmente por sulfatos, nitratos y compuestos orgánicos, mientras que las ultra finas en su mayoría provienen de vehículos automotores e industriales y están compuestas típicamente de aerosoles ácidos que incluyen, algunos metales en transición, estas también son generadas en motores a diésel (Zambrano-García *et al.*, 2009).

Por otro lado, las grandes ciudades se caracterizan por sus altas concentraciones de personas, actividades y materiales, que generan altos niveles de contaminación ocasionando con ello un impacto negativo en el ambiente (Fenger, 1999). Los contaminantes más comunes dentro de las ciudades son el dióxido de azufre (SO₂),

óxidos de nitrógeno (NO, NO₂), ozono (O₃) carbonilos y partículas suspendidas que van acompañadas de metales pesados, así como compuestos químicos orgánicos, como el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (Klumpp, 1994).

El biomonitoreo es una técnica de vigilancia sobre la calidad de aire que permite conocer concentraciones de metales, HAPs y otros compuestos bioacumulables. La técnica ha sido utilizada y se ha ido perfeccionando (Vives *et al.*, 2006). El Biomonitoreo utiliza una serie de biomonitores en series definidas de medición, con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un sitio determinado, para un contaminante específico o un grupo de ellos presentes en dicha zona (Fenger, 1999). Los bioindicadores o biomonitores son organismos o comunidades de ellos que pueden responder a la contaminación atmosférica mediante alteraciones en su fisiología o a través de su capacidad para acumular contaminantes (Klumpp, 1994). Cuando los biomonitores que se utilizan son especies que se encuentran presentes en los ecosistemas a evaluar, entonces se habla de biomonitoreo pasivo. En cambio, cuando los biomonitores son especies que se introducen y se utilizan sistemas de exposición controlada se trata de estudios de biomonitoreo activo (Wolterbeek, 2002).

Algunos de los contaminantes que son transportados por el aire suelen viajar adheridos a partículas. El monitoreo se realiza preferentemente con los organismos que dependen de la atmósfera como principal fuente de humedad y nutrientes, tales como líquenes, musgos y algunas plantas vasculares, aunque también se utilizan árboles. Esta relación se estudia y se observa a través de una correlación positiva entre la concentración de contaminantes en los tejidos (hojas, tallo, raíz) y la cantidad de depósitos atmosféricos (Sloff, 1995, St. Clair *et al.*, 2002.; Wolterbeek, 2002). Mediante un bioindicador se trata de explicar el comportamiento de un contaminante del medio ambiente, explorar la ocurrencia y la dispersión del o los contaminantes, las tendencias en diferentes áreas geográficas, escalas de tiempo, identificar las fuentes de emisión,

la estimación del depósito atmosférico y los cambios ecológicos, ocasionados por la contaminación del aire (Aboal *et al.* 2006).

Las partículas dañan las hojas de las plantas, afectan al crecimiento de éstas, limitan su productividad según la sensibilidad que tengan y pueden ocasionar clorosis, necrosis y epinastia (Katiyar y Dubey, 2000), además de una disminución del contenido de clorofila y aumento del contenido de ácido ascórbico, el cual es un antioxidante (Pourkhabbaz *et al.*, 2010). En las partículas van inmersos metales que llegan a ser tóxicos para las plantas, ya que, en exceso inhiben el crecimiento y producen toxicidad en las células vegetales, llegando en algunos casos a provocar la muerte (Van Assche y Clijsters, 1986).

Los contaminantes del aire emanados por los escapes de vehículos, entran en el rango de partículas que tienen efectos sobre el metabolismo de las plantas incluso antes de que aparezcan síntomas visibles (Viskari *et al.*, 2000).

En este sentido se sabe que árboles en ambientes urbanos, tienen la capacidad de captar gases y partículas, promoviendo con ello la mejora en la calidad del aire (Beckett *et al.*, 1998, 2000), ya que actúan como sumideros de contaminantes y reducen su concentración en el aire.

El análisis químico foliar es utilizado como una forma de seguimiento de diagnóstico y estudios del ambiente. Se ha utilizado para determinar deficiencias de nutrientes y estimación de la toxicidad (Beckett *et al.*, 2000). En bosques urbanos sirve para monitorear la calidad del aire en las grandes ciudades (Pourkhabbaz *et al.*, 2010). Este análisis se lleva a través de la limpieza foliar la cual puede incluir técnicas mecánicas, tales como el secado, tejido humedecido, viento, y el cepillado entre otros. Así como el uso de técnicas con agua u otros solventes limpiadores. Varía debido a la diversidad de

especies de plantas, las diferencias de los tejidos, ya que no existe un procedimiento estándar para todo tipo de muestras (Aboal, 2006). Existen diversos ejemplos de esto a lo largo del tiempo, entre ellos el conducido por Porter (1986) quien realizó un estudio de nueve procedimientos de lavado, utilizando Alconox, HCl y EDTA di sódico en *Ailanthus altissima*. Los análisis de minerales de la hoja en muestras lavadas y sin lavar se llevaron a cabo con un espectrómetro de absorción atómica y se analizó calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na), hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn); para determinar cloro (Cl) se utilizó un electrodo iónico específico, y para titanio (Ti) un procedimiento de espectrofotómetro. Los datos mostraron que el procedimiento que consiste en el lavado a mano con Alconox 1%, seguido por 0.01 M de EDTA di sódico, fue el más efectivo en la eliminación de Fe, Cu, Zn y Ti superficiales y dio lugar a pequeños cambios de las concentraciones de K y Cl en la hoja.

Krivan (1987), estudió el efecto posible del lavado en el tejido foliar sobre la concentración de metales en cuatro plantas ornamentales (*Nerium oleander L.*, *Ficus microcarpa L. f.*, *Ligustrum lucidum Ait. f.*, y *Duranta repens L.*). Los elementos determinados fueron Al, Ba, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mg, Ni, Pb, Zn, y V. Se dividió a la muestra en dos porciones, una de éstas fue lavada con agua destilada, mientras el resto de la muestra no fue lavada. Se encontraron diferencias significativas en concentraciones de metales entre los grupos de hojas. Además se observó que los efectos del lavado difieren con la especie y con el contaminante.

Simmleit *et al.*, (1989), analizaron la función de acículas de coníferas como filtradores de partículas suspendidas. Una parte substancial de lo depositado sobre las acículas es irreversiblemente adsorbido y por lo tanto la contaminación superficial de la hoja incrementa con la edad de las hojas. Las partículas permanentemente adsorbidas son generadas por la combustión de productos, conteniendo altas concentraciones de elementos traza y, debido a su pequeño tamaño, son capaces de entrar al interior de las acículas. Para el análisis químico del material foliar, las hojas se lavaron, agitándose en cloroformo (200 mL por 30 segundos y después se enjuagaron dos

veces con agua destilada) para distinguir entre compuestos superficialmente absorbidos e incorporados.

Zwolinski, *et al.*, (1998), determinaron concentraciones de azufre y los metales cadmio (Cd), cobre (Cu), hierro (Fe), potasio (K), magnesio (Mg), manganeso (Mn), plomo (Pb) y Zinc (Zn) en acículas de *Pinus sylvestris* L. y *Picea abies* L. Karst., creciendo en áreas fuertemente contaminadas en Polonia. Se investigó el efecto del lavado de las acículas con cloroformo (200 mL por 30 segundos y enjuagadas dos veces con agua de ionizada) antes del análisis para la determinación de los elementos, los resultados indicaron diferencias significativas en la concentración entre muestras lavadas y no lavadas para Fe, Cu y Pb en pino, y de Fe, Cu, Pb y Cd en *Picea*. Se concluyó que un eficiente lavado foliar antes del análisis es necesario para determinar la concentración de elementos dentro de las acículas, especialmente de metales pesados.

Alfani *et al.*, (2001), determinaron hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) por cromatografía de gases acoplado a masas (GC-MS) en hojas de *Quercus Ilex* L., para controlar el grado de contaminación en el área urbana de Nápoles en comparación con las zonas rurales. Las muestras de hojas se recogieron en julio de 1998 en cuatro parques urbanos, seis sitios a orilla de carretera y dos sitios en las zonas rurales. El contenido total de HAPs en *Q. Ilex* de hojas varió de 106.6 en un sitio testigo a 4,607.5 $\mu\text{g g}^{-1}$ de las que se encontraban a lo largo de una carretera con una elevada carga vehicular. La presencia de HAPs cancerígenos fue mayor en el área urbana y difieren según el sitio, variando desde 6.7% a 21.3%.

Aksoy *et al.*, (2006), utilizaron a *Fraxinus excelsior* como un biomonitor de la contaminación por metales pesados, para lo cual colectaron follaje en 48 sitios (carretera urbana, área urbana, parque urbano, área industrial, área suburbana y área rural). Dividieron el follaje colectado en dos submuestras; la primera submuestra fue lavada con agua destilada para posteriormente someterse a un proceso de secado y molido de las hojas y luego a un proceso de digestión con (1 HNO₃: 3 HCl). La segunda submuestra fue sometida directamente a un secado y molido y finalmente a un proceso de digestión de igual forma que la anterior. Los elementos a determinar fueron plomo

(Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr). En este caso se encontraron diferencias significativas entre los contenidos de metales mostrando aumento con la creciente urbanización, además en todos los casos se observó que los contenidos de metales eran significativamente mayores en las hojas de la submuestra 2 en donde no se hizo un proceso de lavado.

Pourkhabbaz *et al.*, (2010), colectó hojas de *Platanus orientalis L.* en una metrópoli de Irán de dos sitios (área urbana y área rural) con la finalidad de observar si éstas son dañadas por la contaminación del tráfico vehicular. Muestras de suelo y aire fueron analizadas al igual que las de follaje con un espectrofotómetro de absorción atómica previamente digeridas con HNO₃ (ácido nítrico). Se encontró la presencia de varios elementos tóxicos como: plomo (Pb), zinc (Zn), níquel (Ni), cobalto (Co), cromo (Cr) y cobre (Cu), siendo Pb el elemento más significativo en follaje, suelo y aire. Además el tamaño de la hoja y la densidad de estomas fueron bajos así como la superficie de la hoja, la cual se observó cargada de partículas de polvo en las áreas urbanas, mientras que la cutícula se encontró adelgazada.

Ülkühan *et al.*, (2010), analizaron hojas y corteza (lavadas y sin lavar) de *Cercis siliquastrum L. subsp.* en 59 localidades diferentes, pertenecientes a cinco áreas (urbana, parque urbano, carretera urbana, La Costa del Bósforo y la zona testigo). Estas áreas se probaron para determinar la contaminación por metales pesados en Estambul de 2006-2007. Se analizaron las concentraciones de cromo (Cr), hierro (Fe) y níquel (Ni) en las muestras colectadas con ayuda de un ICP-OES. Los resultados indicaron que el valor máximo de acumulación en Cr correspondió a las muestras de la corteza tomadas en parque urbano ($6.12 \pm 0,59$ mg/g). El valor más bajo detectado fue de $1,63 \pm 0,20$ mg/g. Para el caso de las muestras de hojas, las cantidades más altas fueron para Fe en la hojas no lavadas que se colectaron a orilla de carretera urbana, mientras que las concentraciones más bajas se encontraron en las hojas lavadas del

área testigo, para tal caso los valores fueron de 134.74 ± 35.06 mg/g y 44.97 ± 5.15 mg/g, respectivamente. El promedio más alto para Ni se determinó en muestras de hojas no lavadas de las zonas urbanas y las de carretera ($4.47 \pm 0,82$ mg/g). El valor más bajo se registró en muestras de hojas no lavadas del área testigo (2.19 ± 0.39 mg/g). Los resultados indican que *Cercis siliquastrum* L. subsp. *siliquastrum* es un biomonitor útil para determinar la cantidad de depósitos de metales pesados, excepto para el Fe. Además, las cortezas de árbol se pueden utilizar para mediciones a largo plazo de los depósitos de metales pesados.

Esta cronología de investigación muestra que a lo largo del tiempo y en diversos lugares del mundo la vegetación de las ciudades, ha sido utilizada para monitorear la concentración, distribución y los efectos que la contaminación ocasiona sobre las áreas verdes urbanas.

5. Literatura citada

- Aboal J.R., Real C., Fernández J.A. y Carballeira A. 2006. Mapping the results of extensive surveys: the case of atmospheric biomonitoring and terrestrial mosses. *The Sci. Total Environ.* 356, 256–274
- Alcalá J., Sosa M., Moreno M., Quintana C., Campos A. y Holguín C. (2008)a. Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: Ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 17, 17-28.
- Alcalá J., Sosa M., Moreno M., Quintana G., Miranda S. y Rubio A. (2008)b. Metales pesados en vegetación arbórea como indicador de la calidad ambiental urbana: Ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 17, 39-54.
- Alfani A., Baldantoni D., Maisto G., Bartoli G. y Virzo De Santo A. 2001. Temporal and spatial variation in C, N, S and trace element contents in the leaves of *Quercus ilex* within the urban area of Naples. *Environ. Pollut.* 109, 119-129.
- Aksoy A. y Demirezen D. 2006. *Fraxinus excelsior* as a biomonitor of heavy metal pollution. *Pol. J. Environ. Stud.* 15, 27-33.
- Beckett K.P., Freer-Smith P.H. y Taylor G. 1998. Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environ. Pollut.* 99, 347–360.
- Beckett K.P., Freer-Smith, P.H. y Taylor G. 2000. Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and windspeed. *Glob. Change Biol.* 6, 995–1003.
- Benavides M. H.M., López M. R. y Flores H. J. 2002. Daños a banquetas por arbolado de alineación establecido en cepas en la delegación Coyoacán, Distrito Federal. *Rev. Cien. For. en Mex.* 27, 53-77.
- Campos G.I., Alcaraz E. F., Herrera M., Sosa J., Jiménez M., Delgado E. y Ramírez S. 2007. Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y

morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3, 44-51.

Conner T.L., Norris G.A., Mathew S.L., y Williams R.W. 2001. Individual particle analysis of indoor, outdoor, and community samples from the 1998 Baltimore particulate matter study. *Atmos. Environ.* 35, 3935-3946.

Escobedo F. y Chacalo A. 2008. Estimación Preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la ciudad de México. *Interciencia* 33, 29-33.

Fenger J. 1999. Urban air quality. *Atmos. Environ.* 33, 4877-4900.

Katiyar V. y Dubey P. S. 2000. Growth behavior of two cultivars of maize in response to SO₂ and NO₂. *Environ. Biol.* 21, 317-323.

Krivan V., Schaldan G. y Hausbeck R. 1987. Interpretation of element analyses of spruce-needle tissue falsified by atmospheric surface deposition. *Naturwissenschaften* 74, 242-245.

Klumpp A., Klumpp G. y Domingos M. 1994. Plants as bioindicators of air pollution at the Serra Do Mar near the industrial complex of Cubatao, Brazil. *Environ. Pollut.* 85: 109–116.

Marcazzan G.M., Ceriani M., Valli G., y Vecchi R. 2003. Source apportionment of PM₁₀ y PM_{2.5} in Milan (Italy) using receptor modeling. *The Sci. Total Environ.* 317, 137-147.

Molina L.T., y Molina M. J. 2004. Improving air quality in megacities: Mexico City Case Study. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1023, 142-158.

Parungo F., Nagamoto C., y Ma

el R. 1987. A study of the mechanisms of acid rain formation. *J. Atmos. Sci.* 21, 3162-3174.

- Porter J.R. 1986. Evaluation of washing procedures for pollution analysis of *Ailanthus altissima* leaves. *Environmental Pollution*. 12, 195-202.
- Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R. y Polle A. 2010. Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees, *Platanus orientalis* L. *Bull. Environ Contam Toxicol*. 85, 251-255.
- Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal (SMA). 2008. Inventario de emisiones de contaminantes tóxicos de la ZMVM. Gobierno del Distrito Federal. Accedido el 10 de julio, 2012, desde:
<http://www.sedema.df.gob.mx/flippingbook/inventario-emisiones-zmvm-toxicos2010/>
- Simmleit N., Tóth A., Székely T. y Schulten H.R. 1989. Characterization of particles absorbed on plant surfaces. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* 36, 7-11.
- St. Clair S.B., St. Clair L.L. Mangelson N.F. y Weber D.J. 2002. Influence of growth form on the accumulation of airborne copper by lichens. *Atmos. Res.* 36, 5637–5644.
- Ülkühan Y., İlker I., Özyiğit y Serin M. 2010. Judas tree (*Cercis siliquastrum* L. subsp. *siliquastrum*) as a possible biomonitor for Cr, Fe and Ni in Istanbul (Turkey). *Rom. Biotech. Lett.* 15, 4979- 4989
- Van Assche, F. y Clijsters, H. 1985. Inhibition of photosynthesis in zinc effects on electron transport and photophosphorilation. *Physiol. Plant.* 717-721.
- Vázquez-Cruz C. 2009. Estudio del comportamiento dinámico de la contaminación por material particulado PM10 en la zona metropolitana del Valle de México. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de México. Accedido el 18 de enero, 2013, desde:
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3330/Tesis_Carlos.pdf?sequence=1

- Viskari, E.L., Surakka J., Pasanen P., Mirme A., Kössi S., Ruuskanen J. y Holopainen J.K. 2000. Responses of spruce seedlings (*Picea abies*) to exhaust gas under laboratory conditions. *Plant-insect interactions. Environ. Pollut.* 107, 89–98.
- Vives A.E.S., Moreira S., Brieza S.M.B., Madeiros J.G.S., Tomazello Filho M., Zucchi O. L.A.D., y Filho V. F.N. 2006. Monitoring of the environmental pollution by trace element analysis in tree-rings using synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescenc. *Spectrochim Acta B.* 61, 1170-1174.
- WHO. 2006. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulphur dioxide. Global update 2005. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark. (p. 74)
- Wolterbeek H. T. 2002. Biomonitoring of trace element air pollution: principles, possibilities and perspectives. *Environ. Pollut.* 120, 11–21.
- Zwolinski J., Matuszczyk I. y Zwolinska B. 1998. Accumulation of sulphur and metals in and on pine (*Pinus sylvestris* L.) and spruce (*Picea abies* (L.) Karst) needles in industrial regions in southern Poland. *Folia Forestalia Polonica A*, 47-57.

CAPÍTULO I. CONCENTRACIÓN SUPERFICIAL E INTRACELULAR DE PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS EN FOLLAJE DE BOSQUES URBANOS DEL VALLE DE MÉXICO.

1.1 Resumen

El follaje de ciertas especies de la vegetación urbana puede ser utilizado como bioindicador del nivel de contaminación atmosférica por metales pesados y/o partículas. En este trabajo se cuantificó la concentración superficial e intracelular de Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Cobalto (Co) y Cadmio (Cd), en follaje de árboles de *Fraxinus uhdei* (Wenz.), ubicados en tres bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), durante las cuatro estaciones del año, con la finalidad de conocer el comportamiento temporal y espacial de las concentraciones superficiales e intracelulares de dichos elementos sobre la vegetación urbana. Por otro lado, también se investigó si existe alguna relación entre la concentración de estas partículas y la distancia a las calles que rodean a los árboles. Se diseñó un experimento factorial con dos factores: Bosque y época estacional. El factor bosque tuvo tres niveles (Parque Naucalli, Bosque de Chapultepec y Bosque de Tlalpan) y el factor época estacional tuvo cuatro niveles correspondientes a cada una de las estaciones del año. En cada bosque se seleccionaron 15 árboles de *Fraxinus uhdei* (Wenz.), se colectó una muestra de follaje a cada uno, por estación del año y se le determinaron los elementos químicos mencionados, depositados sobre la superficie de las hojas, así como los intracelulares. Para hacer las comparaciones entre depósitos superficiales e intracelulares se utilizó la prueba de *t*. Para comparar entre estaciones del año y bosque se utilizó un análisis de varianza y prueba de Tukey. La relación entre las concentraciones superficiales y la distancia más corta a las calles aledañas a los bosques se hizo mediante el procedimiento Stepwise con el paquete estadístico Minitab®. Se utilizó el software WRPLOT View Freeware Wind rose plots versión 7 para medir la dirección y velocidad de los vientos con datos de las estaciones meteorológicas más cercanas a los parques, aunado a lo anterior se consiguieron datos de PM₁₀ y Pb de partículas suspendidas en el aire para observar si presentaban

alguna relación con las concentraciones obtenidas en este estudio. Los resultados obtenidos muestran que existen mayores concentraciones superficiales que intracelulares excepto en el caso del Níquel. Por bosque y por concentración superficial, los promedios más altos de Cu (10.43 mg kg^{-1}) se encontraron en el parque Naucalli, los de Pb (1.7 mg kg^{-1}), Ni (2.2 mg kg^{-1}), Cr (0.3 mg kg^{-1}) y Cd (0.08 mg kg^{-1}) en el bosque de Chapultepec y los de Zn (18.67 mg kg^{-1}) en el bosque de Tlalpan, por época estacional, el verano presentó los promedios más altos de Cu (9.5 mg kg^{-1}), Zn (21.8 mg kg^{-1}), Ni (2.1 mg kg^{-1}) y Cr (0.2 mg kg^{-1}) y el invierno los de Pb (2.8 mg kg^{-1}) y Cd (0.06 mg kg^{-1}).

Para el caso de las concentraciones intracelulares Naucalli mostró los promedios más altos de Zn (4.6 mg kg^{-1}), Pb (0.2 mg kg^{-1}) y Ni (10.4 mg kg^{-1}).

En el verano se encontraron los promedio más altos de Cu (4.15 mg kg^{-1}), Zn (9.6 mg kg^{-1}), Ni (12.72 mg kg^{-1}), Cr (0.64 mg kg^{-1}) y Pb (0.5 mg kg^{-1}), mientras que Cd fue en promedio más alto en primavera (0.08 mg kg^{-1}).

En cuanto a las interacciones entre bosque y época estacional, para Cu y Cd se encontró efecto significativo. Las correlaciones más significativas entre la distancia a las calles y las concentraciones superficiales de metales, ocurrieron en los casos de Cu y Zn y en algunos casos Pb y Cd, también se observó una acción del viento sobre los depósitos en algunas épocas del año y con la concentración de partículas en el aire.

Palabras clave: contaminación ambiental, metales pesados. *Fraxinus uhdei* (Wenz.), Distrito Federal.

CHAPTER I. SURFACE DEPOSITS AND INTRACELLULAR CONCENTRATION OF ATMOSPHERIC PARTICLES IN FOLIAGE OF URBAN FORESTS IN THE VALLEY OF MEXICO

1.2 Abstract

The foliage of some urban vegetation species can be used as a bio-indicator of the level of atmospheric pollution by heavy metals and/or particles. In this work, the surface and the intracellular concentrations of copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), nickel (Ni), chromium (Cr), cobalt (Co) and cadmium (Cd) were quantified in the foliage of *Fraxinus uhdei* (Wenz.) trees, located in tree urban forest of the Metropolitan Area of Mexico (ZMMV), during the four seasons of the year, in order to determine the temporal and spatial behavior of superficial and intracellular concentrations of these elements on the urban vegetation. On the other hand, it was also investigated whether there is any relationship between the concentration of these particles and the distance between the surrounding streets and the trees. We established a factorial experiment with two factors: forest and the season. The forest factor had three levels (Naucalli Park, Chapultepec Forest and Tlalpan Forest) and the season factor had four levels corresponding to each one of the seasons. In each forest, 15 *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh trees were selected, a sample of foliage from each one was collected per season of the year and the previously mentioned chemical elements were determined both the deposited on the surface of the leaf and the intracellular ones. To compare the superficial and intracellular deposits the T- Test was used. To compare the season of the year and the forest both the *Analysis of Variance* (ANOVA) and *Tukey's test* were used. The relationship between the superficial concentrations and the shortest distance to the surrounding streets near the forest was done by Minitab® Stepwise procedure. The software WRPLOT View Freeware Wind rose plots version 7 was used to measure the direction and velocity of the wind with data of the closest meteorological stations to the parks; in addition, PM₁₀ y Pb data of suspend particles in the air was obtained in order to observe whether they were related to the concentrations obtained in this study. The results show that are more superficial concentrations than intracellular ones, with

the exception of nickel. Per forest and per superficial concentration, the highest averages of Cu (10.43 mg kg^{-1}) were found in Naucalli Park; Pb (1.7 mg kg^{-1}), Ni (2.2 mg kg^{-1}), Cr (0.3 mg kg^{-1}) and Cd (0.08 mg kg^{-1}) were found in Chapultepec Forest and Zn (18.67 mg kg^{-1}) in Tlalpan Forest. Per season, summer presented the highest average of Cu (9.5 mg kg^{-1}), Zn (21.8 mg kg^{-1}), Ni (2.1 mg kg^{-1}) and Cr (0.2 mg kg^{-1}) and winter presented the highest of Pb (2.8 mg kg^{-1}) and Cd (0.06 mg kg^{-1}).

In the case of intracellular concentrations, Naucalli Park showed the highest averages of Zn (4.6 mg kg^{-1}), Pb (0.2 mg kg^{-1}) and Ni (10.4 mg kg^{-1}). In summer the highest average of Cu (4.15 mg kg^{-1}), Zn (9.6 mg kg^{-1}), Ni (12.72 mg kg^{-1}), Cr (0.64 mg kg^{-1}) and Pb (0.5 mg kg^{-1}) was found, while the highest average in spring was of Cd (0.08 mg kg^{-1}).

In relation to the interactions between the urban forests and the season, a significant effect was found for Cu and Cd. The most significant correlations between the distances of the surrounding streets and the superficial concentrations of metals occurred with Cu and Zn, and in some cases with Pb and Cd.; an action of the wind on the deposit in some seasons and with the concentration of the air particles was also observed.

Key Words: environmental pollution, heavy metal, *Fraxinus uhdei* (Wenz.), Distrito Federal

1.3 Introducción

Los árboles urbanos han empezado a ser valorados ambientalmente debido a los beneficios que aportan a la sociedad. Éstos influyen de manera positiva en el ambiente, ya que reducen el escurrimiento, minimizando con ello la erosión del suelo y la producción de partículas suspendidas (Escobedo *et al.*, 2008); intervienen en el descenso de la temperatura (Nowak *et al.*, 2006). La urbanización y la industria emiten sustancias contaminantes que ponen en riesgo la vegetación (Vives *et al.*, 2006 y Campos *et al.*, 2007), los bosques, mejoran la calidad del aire, ya que poseen la capacidad de filtrar y capturar gases y partículas (Beckett *et al.*, 2000).

La vegetación arbórea en zonas urbanas puede reducir la concentración de los contaminantes atmosféricos tales como ozono, material particulado, azufre, monóxido de carbono y óxido de nitrógeno (De la Maza *et al.*, 2005; Escobedo *et al.*, 2008; Nowak *et al.*, 2006). Lo anterior da idea del poder de retención de partículas en las hojas de los árboles en función de la especie y las características morfo-anatómicas de la hoja, tales como superficie expuesta y grado de pilosidad (Dalmasso *et al.*, 1997). Kabata-Pendias (2011), menciona que los metales que forman parte de la contaminación atmosférica se depositan en el suelo y el ambiente y pueden entrar en los tejidos de la planta. Esta es la razón de utilizar a la vegetación como un indicador biológico, lo cual ha sido una práctica recurrente por la facilidad que ésta tiene para adherir partículas suspendidas, producto de procesos de nucleación, condensación y acumulación de partículas nanométricas y submicrométricas, así como la aglomeración de otras partículas de mayor diámetro, denominadas finas (1-2.5 μm) y gruesas ($> 2.5 \mu\text{m}$) (Sosa *et al.*, 2012); todo ello al reaccionar con gases generados a partir de la quema de combustibles fósiles por vehículos y procesos industriales en los que se encuentran suspendidas (Meza *et al.*, 2010). El tamaño de las partículas es una de las características físicas que las define.

Con relación a la vegetación la contaminación generan cambios en los contenidos de clorofila, anatomía y morfología foliar al deformarse los estomas y disminuir la pared celular de las hojas (Pourkhabbaz *et al.*, 2010). También se han detectado efectos en la asimilación del nitrógeno, y la disminución de la asimilación de nutrientes y

decrecimiento en el proceso fotosintético y tasa de transpiración (Tzvetkova y Kolarov., 1996).

Fenn *et al.*, (2002) mencionan que el plomo es el principal metal pesado contaminante de los bosques del Valle de México, sin embargo ha disminuido desde mediados de los noventas cuando dejó de incluirse en los combustibles. Escobedo y Chacalo (2008); reportan que el servicio de descontaminación y remoción de partículas contaminantes que presta la cobertura boscosa de la Ciudad de México, calculado mediante el Modelo de Efectos del Bosque Urbano (UFORE), indica que puede haber una reducción del 1% de O₃ y PM₁₀ dando como resultado un ahorro de 10 millones de dólares americano al año, en términos de salud humana. Por otro lado, Jáuregui, desde 1958, indicó que los vientos prevalecientes en el Valle de México van desde noreste al sur, cargados de contaminación. Lo anterior tiene un efecto nocivo, porque el aire viciado promueve la senescencia de las hojas (Lee *et al.*, 1981; Kohert *et al.*, 1986) y como consecuencia se pueden presentar desajustes en el crecimiento y desarrollo de la vegetación urbana.

El biomonitoreo es una técnica que utiliza organismos biológicos como monitores del impacto y la extensión de los contaminantes aéreos. Esta técnica ha sido de gran ayuda en la ciudad de México desde los 70's (de Bauer, 1972) hasta los últimos años, ya que a través de ella se ha logrado conocer el depósito, la acumulación y distribución de los contaminantes (Zurayk *et al.*, 2001). Durante las últimas décadas ha habido un aumento en el uso de hojas de plantas superiores como bioindicadores de contaminación por metales pesados en el medio terrestre (Al-Shayeb *et al.*, 1995; Aksoy y Demirezen, 2006; Campos *et al.*, 2007; Alcalá *et al.*, 2008a; Zambrano *et al.*, 2009; Pourkhabbaz *et al.*, 2010).

El propósito de este estudio se centró en determinar la concentración intracelular y superficial de partículas de Cu, Zn, Cr, Ni, Pb, Co y Cd depositadas en el follaje de árboles de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) de tres bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) en cada una de las estaciones del año. La selección de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) se basó en que cerca del 80% del arbolado urbano en la

Ciudad de México está compuesto por los géneros *Fraxinus* y *Ligustrum* (Benavides *et al.*, 2002). Además el género *Fraxinus* está reportado como tolerante a la contaminación de ambientes urbanos (Aksoy y Demirezen, 2006; Catinon *et al.*, 2008).

1.4 Materiales y métodos

1.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en tres bosques urbanos de la ZMVM (Fig. 1.1). El primero fue el parque Naucalli, el cual cuenta con una superficie de 42 ha y se localiza en la parte norte de la ZMVM en las coordenadas 19° 29' 27.6" latitud N y 99° 14' 21.2" longitud W. El bosque de Chapultepec fue considerado también, ya que representa el área verde de mayor extensión dentro de la Ciudad de México, ocupando una superficie de 686.01 hectáreas. Éste se localiza al poniente de la Ciudad de México, en las coordenadas 19° 23' 40" latitud N y 99° 10' 40" longitud W. Finalmente, el bosque de Tlalpan, ubicado en la parte sur de la ciudad en las coordenadas 19° 17' 38.2" latitud N, y 99° 11' 36.3" longitud W. Este parque, cuenta con una superficie de 252 ha y desde el año de 1997 es considerado como un Área Natural Protegida (ANP).

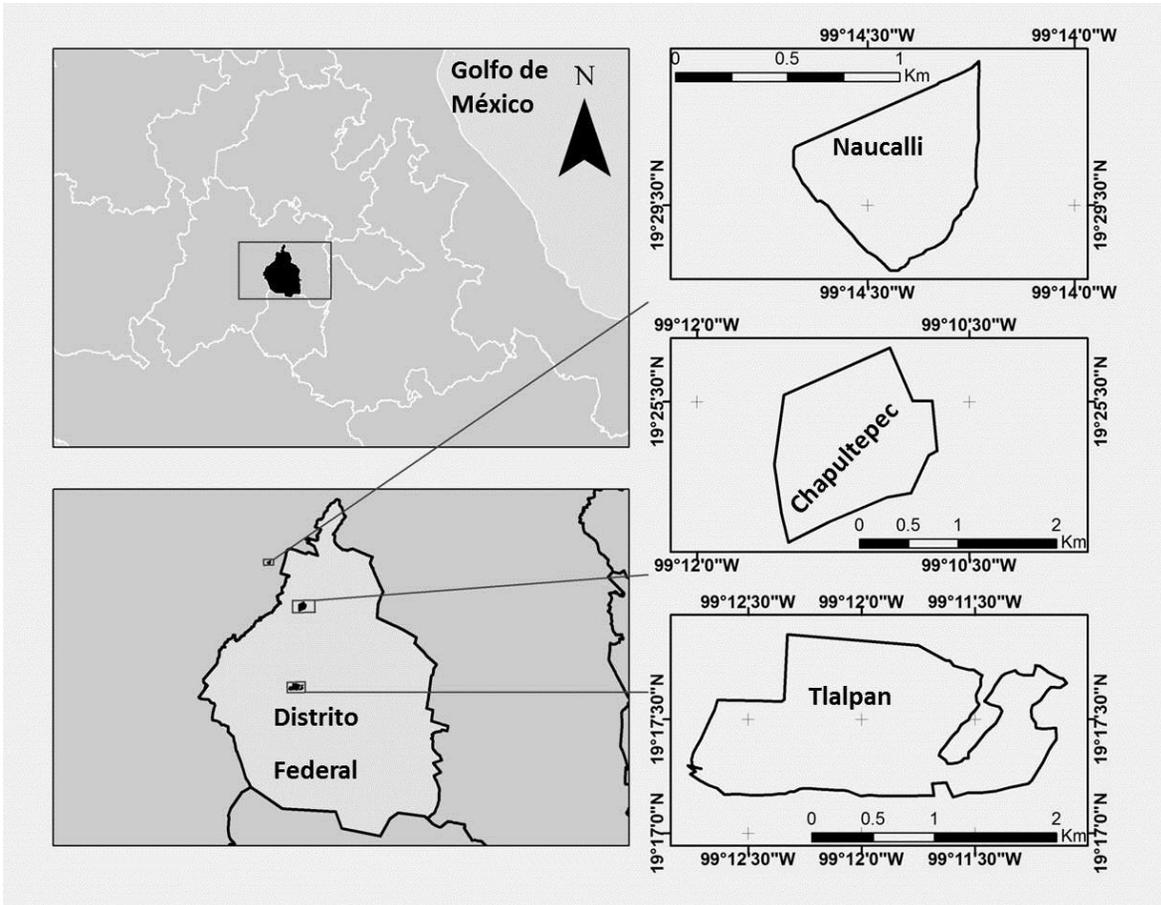


Figura 1.1. Ubicación del área de estudio

1.4.2. Colecta de material y variables evaluadas

Se colectaron hojas de los árboles, ubicadas a una altura de 7 metros sobre el nivel del suelo, una vez por cada estación del año y durante un año, en los bosques de Naucalli, Chapultepec y Tlalpan. Lo anterior se realizó para un total de 45 árboles de la especie *Fraxinus uhdei* (Wenz.) distribuidos equitativamente en cada uno de los tres bosques urbanos. Para ello se determinó en cada bosque un transecto, procurando un espaciamiento de 50 m entre cada árbol. Además del espaciamiento entre los árboles seleccionados se consideraron las condiciones particulares de cada bosque, tales como distribución de la especie, obstáculos y avenidas circundantes. Se procuró que la muestra de hojas fuera de toda la copa del árbol. La colecta se hizo utilizando una

garrocha con tijera para podar. Además se obtuvo la ubicación de cada árbol por bosque con ayuda de un Sistema de Geoposicionamiento Global (GPS) Garmin eTrex y posteriormente con un Sistema de Información Geográfica (GIS) ArcGis 8.3. Se calcularon las distancias más cercanas de los árboles muestreados a las avenidas que los rodean (Fig. 1.2). Se consiguieron datos de precipitación, dirección y velocidad del viento por época estacional (2011 y 2012), de las estaciones meteorológicas automáticas de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) más cercanas a los bosques (Presa madin, tezontle y ecoguardas) para observar si existía alguna acción de estas variables con respecto a las concentraciones superficiales de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd. El análisis de los vientos se realizó con el software WRPLOT View Freeware Wind rose plots versión 7, con el cual se construyeron gráficos de rosa de vientos y se determinó la dirección y la velocidad de éstos, para ubicar la velocidad se usó la escala de Beaufort¹ modificada para tierra. Adicionalmente se consiguieron datos de partículas de PM₁₀ y Pb suspendidas en el aire que reporta el sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) de las estaciones más cercanas a los sitios de estudio: Fes Acatlán (FAC), Merced (MER) y Pedregal (PED) para ver si existía alguna relación de estas partículas con respecto a las concentraciones encontradas.

¹La Escala de viento de Beaufort (1806) es un sistema usado para estimar la velocidad del viento, tiene como unidad de medida el número de Beaufort que se compone de la velocidad de viento, un término descriptivo y los efectos visibles sobre los objetos en tierra y en la superficie marina. Esta escala fue diseñada por Sir Francis Beaufort (1777-1857), hidrógrafo de la Marina Real Británica.

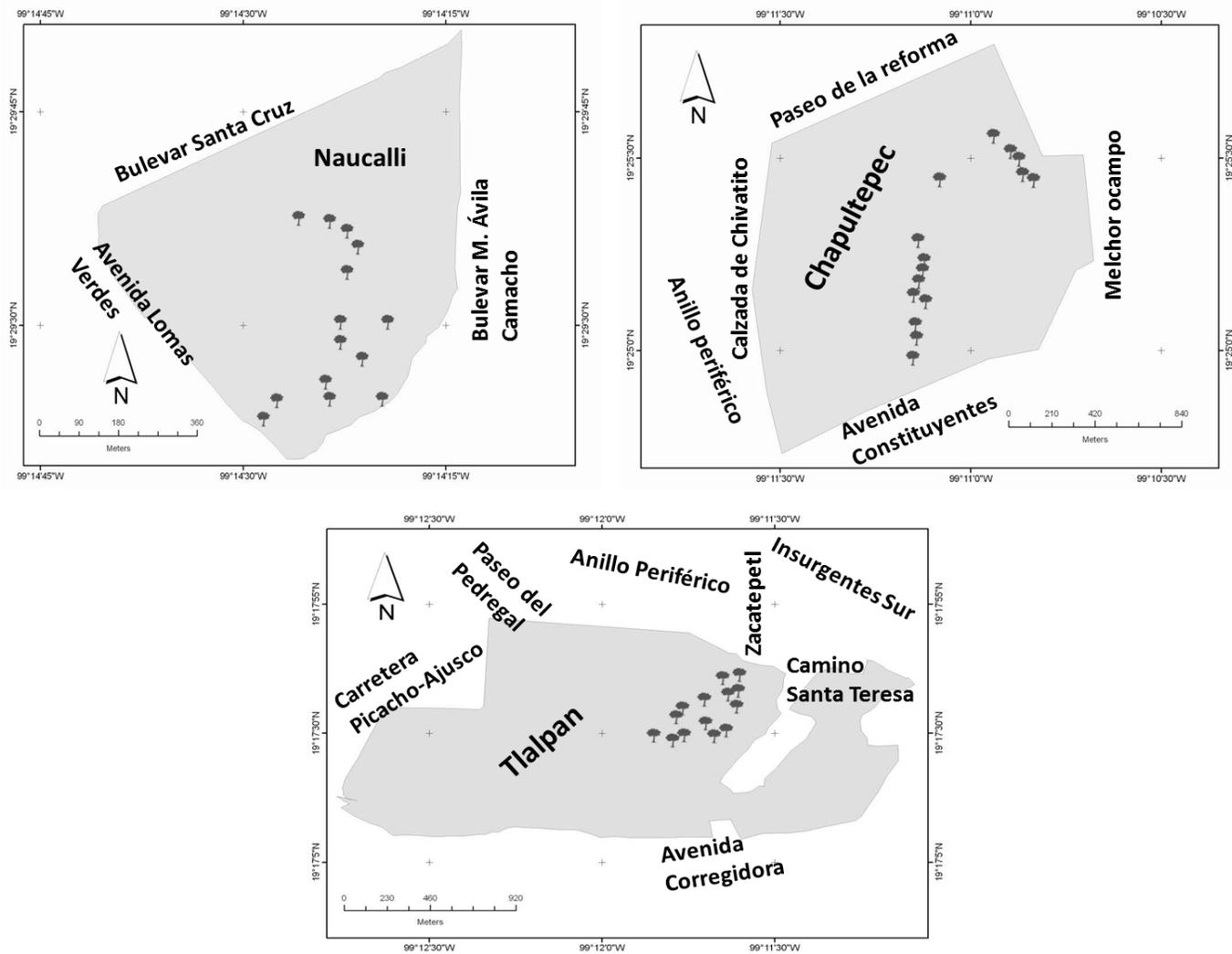


Figura 1.2. Ubicación geográfica de los árboles muestreados y principales avenidas aledañas.

1.4.3. Procesamiento de las muestras en el laboratorio

El trabajo experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Ciencias Ambientales, Postgrado de Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados, ubicado en el Estado de México. En la primavera y el verano del 2012, se colectó una muestra compuesta por árbol, la cual fue subdividida en dos sub-muestras. De la primera, se pesaron 20 g de follaje húmedo por árbol y éste fue sometido a un lavado con una solución desorbente a base de EDTA disódico a una relación molar Pb/EDTA=0.12, tal y como lo hicieron Olguín *et al.*, (2005) con la finalidad de desorber los metales adheridos a la superficie de las hojas, ya que el EDTA es un compuesto que tiene la capacidad de adsorber metales presentes en una solución o material. Al digerir la biomasa lavada se cuantificó la concentración intracelular de los metales analizados.

La segunda sub-muestra permaneció sin ningún tratamiento y se utilizó para cuantificar la concentración total de metales. La concentración superficial de los metales se determinó por diferencia.

Después de realizar los lavados, ambas muestras se secaron en horno hasta que alcanzaron peso constante a una temperatura de 75°C y posteriormente fueron molidas en un molino marca GI y tamizadas con una malla de 2 mm. Se pesaron 0.25 g de la muestra molida y se sometieron a un proceso de digestión con 6 mL de HNO₃ en un digestor tipo micro ondas. Las sub-muestras fueron aforadas a 25 mL y filtradas con papel whatman sin cenizas del número 45.

En los muestreos de otoño e invierno del 2011, se colectó una única muestra a la que se le aplicó primero un lavado con una solución desorbente de EDTA relación molar Pb/EDTA=0.12, tal como se hizo para la sub-muestra de primavera y verano. Se realizó un segundo lavado con agua deionizada. Las soluciones resultantes de los lavados se analizaron químicamente mientras que la muestra de material vegetal fue secada y digerida para su análisis. En este caso la concentración intracelular se obtuvo directamente a partir de la digestión del material vegetal y la concentración superficial de metales también se obtuvo de manera directa al analizar las aguas de lavado.

La lectura de todas las muestras se realizó con un equipo ICP (Inductively Coupled Plasma) modelo 3000, con el cual se determinó la concentración de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd.

Para conocer las concentraciones superficiales que se depositan sobre las hojas se realizaron dos tipos de manejo:

- 1) Una sub-muestra de hojas se lavó con EDTA y las hojas se digirieron. Al lavar así, se desorbieron los metales superficiales y sólo se determinó la concentración intracelular del metal.
- 2) Otra sub-muestra de hojas, se lavó con EDTA y la determinación de metales se realizó al agua de lavado. En este caso, se determinaron directamente los metales que estaban adheridos a la superficie de las hojas.

La concentración total de metales en las muestras de hojas se obtuvo a partir de la ecuación:

$$C_t = C_i + C_s$$

Dónde:

C_t = Concentración total de metales (superficiales e intracelulares)

C_i = Concentración intracelular (concentración en hojas lavadas con EDTA y digeridas)

C_s = Concentración superficial de metales obtenida por determinación directa al agua de lavado con EDTA

Los datos se analizaron mediante Análisis de Varianza (ANOVA) para un diseño factorial con dos factores: 1) Bosque con tres niveles (Naucalli, Chapultepec y Tlalpan), 2) Época estacional con 4 niveles (primavera, verano, otoño e invierno) cuyo modelo general es: $y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ijk}$

Dónde:

μ = es la media

α_i = bosque

β_j = época estacional

i = efecto del i -ésimo nivel del bosque

j = efecto del j -ésimo nivel de la época estacional

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de interacción entre el i -ésimo nivel del bosque y el j -ésimo nivel de la época estacional.

e_{ijk} = término de error

Los supuestos de esta técnica se justificaron mediante el Teorema del Límite Central y la homocedasticidad fue cubierta en todos los casos. Todos los análisis se realizaron con el paquete estadístico MINITAB® versión 14, considerando un valor de confiabilidad de $\alpha = 0.05$. Se probaron los efectos del bosque y la estación del año sobre las concentraciones tanto superficiales como intracelulares. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey al 95% de confianza. En total se analizaron 180 muestras distribuidas en 45 árboles por ciclo estacional durante un año y se consideró como unidad experimental a cada bosque. Para determinar si existen diferencias entre el tipo de acumulación ya fuera superficial o intracelular se utilizó una prueba de t con un valor de $\alpha = 0.05$. Y para las correlaciones entre las concentraciones superficiales sobre el follaje de los árboles y las avenidas que los rodean, se realizó primero una regresión múltiple de cada uno de los materiales particulados (Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd) en función de las distancias más cortas a cada avenida a través del método de Stepwise con forward selection. Una vez que se determinó la significancia de cada avenida, se procedió a realizar una regresión lineal simple con aquellas partículas cuyos datos lo permitieron.

1.5 Resultados y Discusión

Los resultados de las acumulaciones intracelulares o superficiales indican que de los metales estudiados, el cobalto no se detectó en ninguna de las muestras. Se encontraron diferencias significativas entre los depósitos superficial e intracelular a excepción del níquel (Cuadro 1.1).

Cuadro 1-1. Concentraciones superficiales e intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr Y Cd en follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) en bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Metal (mg kg⁻¹)	Superficial	Intracelular
Cu	7.73 ± 5.39	1.48 ± 3.22
Zn	16.0 ± 10	3.64 ± 7.62
Pb	3.21 ± 3.48	0.19 ± 0.57
Ni	5.26 ± 9.43	5.93 ± 8.95
Cr	0.59 ± 0.58	0.44 ± 0.73
Cd	0.07 ± 0.05	0.06 ± 0.04

Nota: Los datos son medias, (± es la desviación estándar)

Se registraron diferencias significativas en las concentraciones de Cu a nivel bosque, época estacional y la interacción entre ambos (Cuadros 1.2 y 1.3), lo que indica que las concentraciones cambian cuando se trata de algún bosque en particular o alguna época estacional y cuando estos dos factores se combinan. De este elemento se sabe que, es esencial en las plantas ya que interviene en procesos fisiológicos como: fotosíntesis, respiración, metabolismo de nitratos y carbohidratos, permeabilidad al agua, reproducción y resistencia a las enfermedades en las plantas (Kabata-Pendias, 2011). Los mayores depósitos superficiales promedios se hallaron en el parque Naucalli ubicado al norte (Cuadro 1.2 y Figura 1.3a), lo cual tiene sentido, ya que la tasa de dispersión de partículas suspendidas en el ambiente está influenciada por factores meteorológicos principalmente la dirección del viento y en este caso los vientos predominantes que se observaron durante el desarrollo de este estudio fueron Noroeste y Noreste principalmente para los bosques Chapultepec y Tlalpan (Figuras 1.4 -1.6). Además, este parque está fuertemente influenciado por el tránsito vehicular y hay estudios como el de Aksoy y Demerizen (2006) quienes señalan que la principal causa de acumulación de contaminantes en la vegetación de zonas urbanas es ocasionada por una alta tasa vehicular.

En este sentido el Cu es proveniente del desgaste de las balatas en los autos (Wahlin *et al.*, 2006) y también emana de los escapes de automóviles como producto del desgaste que existe en ellos al realizarse el proceso de la combustión, sobre todo en vehículos que utilizan diésel (Wang *et al.*, 2003). La mayor concentración promedio tanto superficial como intracelular del Cu se presentó en la época del verano (Cuadro 1.2 y Fig. 1.9c y 1.9d) justo después de las tormentas de polvo cargadas de contaminantes que ocurren en el periodo de sequía (Jáuregui, 1989).

Cuadro 1-2. Concentraciones superficiales e intracelulares de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr Y Cd en hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) en Parque Naucalli y los Bosques de Chapultepec y Tlalpan.

Metal (mg kg ⁻¹)	Naucalli		Chapultepec		Tlalpan	
	superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular
Cu	10.43 ± 6.53 ^a	1.07 ± 2.51 ^a	6.64 ± 4.78 ^b	1.99 ± 3.33 ^a	6.09 ± 3.33 ^b	1.36 ± 3.82 ^a
Zn	15.86 ± 8.29 ^b	4.6 ± 8.29 ^a	13.51 ± 7.74 ^b	2.96 ± 7.74 ^a	18.67 ± 12.73 ^a	3.26 ± 12.73 ^a
Pb	0.61 ± 1.42 ^b	0.22 ± 0.86 ^a	1.7 ± 3.37 ^a	0.11 ± 0.24 ^a	0.66 ± 1.77 ^b	0.15 ± 0.31 ^a
Ni	0.29 ± 0.82 ^a	10.45 ± 11.46 ^a	2.22 ± 6.89 ^a	6.69 ± 8.85 ^b	0.01 ± 0.07 ^a	0.99 ± 2.77 ^c
Cr	0.21 ± 0.42 ^b	0.27 ± 0.64 ^b	0.34 ± 0.60 ^a	0.71 ± 0.85 ^a	N/d	0.18 ± 0.3 ^b
Cd	0.03 ± 0.03 ^b	0.05 ± 0.03 ^b	0.08 ± 0.06 ^a	0.10 ± 0.07 ^a	0.05 ± 0.06 ^b	0.06 ± 0.04 ^b

Notas: Para un elemento y tipo de acumulación, letras iguales significa concentraciones estadísticamente iguales. N/d= no determinado. ± es la desviación estándar

El zinc presentó las concentraciones foliares promedio (intracelulares) más altas en el verano (Cuadro 1.3 y Fig. 1.9d). En esta época del año existe mayor traslocación interna de nutrientes debido a la mayor actividad fisiológica característica de la temporada. El Zn probablemente tiene mayor absorción según la planta lo requiera y este quizá tiende a acumularse primeramente en las hojas, ocasionando que este elemento cambie de una época estacional a otra. Aunado a lo anterior, en los ecosistemas donde Zn es un contaminante del aire, este elemento muchas veces emana del desgaste de llantas y de implementos de autos que son tratados para evitar

la corrosión, además tiende a ser sensible en suelos con pH ácidos (Pagotto *et al.*, 2010) y se deposita en las partes superiores de las copas de las plantas (Kabata-Pendias, 2011) y desde el follaje puede ser absorbido a través de los estomas. El bosque de Tlalpan presentó los depósitos más altos de este elemento de manera superficial (Cuadro 1.2), lo cual pudiera atribuirse a que este bosque se encuentra colindante con un parque de diversiones al NW dirección en la que se observó el viento para el verano y el otoño (Figura 1.5), es sabido que de manera industrial el Zn se utiliza como un protector del acero y el hierro frente a la corrosión, lo cual lo hace más resistente (Mahmud *et al.*, 2010; Guzmán y Ocampo 2011). Es probable que las piezas metálicas en el parque de diversiones desprendan por fricción partículas de Zn y éstas a su vez estén siendo transportadas por acción de viento a los árboles. Por otro lado la lámina de la precipitación observada más alta fue para este bosque y en el verano, sin embargo la lámina en promedio registrada fue muy baja de 0.06mm (Figura 1.8) por lo que quizás las pérdidas por lavado de la precipitación fueron muy bajas.

El Pb es considerado no esencial en las plantas ya que no desempeña ninguna función biológica en ellas y además resulta tóxico (Khan *et al.*, 2008). El bosque de Chapultepec presentó la concentración superficial promedio más alta de éste elemento (Cuadro 1.2), lo cual puede atribuirse a que quizás existe un depósito de las partículas de plomo suspendidas en el aire sobre el follaje de los árboles, ya que hay estudios que demuestran que este metal aún sigue presente el ambiente como resultado de la combustión automotriz por más de 60 años cuando la gasolina aun lo contenía, sumado a otras fuentes como las pinturas hechas a base de plomo, baterías de automóviles, camiones, motocicletas y las latas hechas a base de este metal (Murray *et al.*, 2004, Alcalá *et al.*, 2008b). Lo anterior tendría sentido al contrastar estos resultados con lo reportado por la estación meteorológica cercana al bosque, en donde se observó (Figura 1.6) que las concentraciones de partículas PM_{10} suspendidas en el aire son más altas en Chapultepec casi todo el año con respecto a los otros dos bosques.

De manera intracelular se observó que las concentraciones promedio de Pb más altas las presentó el parque Naucalli (Cuadro 1.2), lo cual indica que este elemento se encuentra depositado en el suelo y está siendo absorbido por las plantas a través de la

raíz. En cuanto a la estación del año, las concentraciones promedio más altas, se encontraron en el invierno (Cuadro 1.3), justo cuando los niveles de contaminación antropogénica aumentan, debido a que existe una mayor quema de combustibles (Celis *et al.*, 2007); además de que el aire frío promueve que se queden en suspensión las partículas que en él se depositan, incrementando con ello la concentración de partículas en la atmósfera.

Los resultados observados en el bosque de Chapultepec, tanto superficialmente (1.7 mg kg^{-1}) como intracelularmente (0.11 mg kg^{-1}) (Fig. 1.3c), son menores a los reportados por Gutiérrez (2012) para *Fraxinus uhdei* en la Zona Metropolitana de Guadalajara (9.6 en el verano y en el otoño 8.6 mg kg^{-1}) y a los de Aksoy y Demirezen (2006) para *Fraxinus excelsior* (12.39 mg kg^{-1}) en un parque urbano.

Cuadro 1-3. Concentraciones promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd depositadas sobre hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) en cuatro estaciones del año.

Metal (mg kg ⁻¹)	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
	Superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular
Cu	9.43 ± 6.1 ^a	1.89 ± 2.71 ^b	9.55 ± 7.35 ^a	4.15 ± 4.67 ^a	5.67 ± 3.01 ^b	0.01 ± 0.01 ^d	5.80 ± 2.58 ^b	0.15 ± 0.01 ^c
Zn	20.88 ± 9.06 ^a	5.52 ± 4.23 ^b	21.82 ± 14.68 ^a	9.6 ± 11.78 ^a	10.39 ± 2.89 ^b	0.01 ± 0.01 ^d	10.65 ± 4.12 ^b	0.03 ± 0.02 ^c
Pb	0.01 ± 0.23 ^c	0.30 ± 0.34 ^b	0.02 ± 0.06 ^c	0.50 ± 0.98 ^a	0.17 ± 0.88 ^b	0.01 ± 0.01 ^c	2.81 ± 3.52 ^a	0.01 ± 0.01 ^c
Ni	0.95 ± 1.88 ^a	11.03 ± 1.88 ^b	2.13 ± 6.69 ^a	12.72 ± 6.69 ^a	N/d	0.01 ± 0.01 ^c	N/d	0.01 ± 0.01 ^c
Cr	0.15 ± 0.17 ^c	0.65 ± 0.75 ^b	0.24 ± 0.46 ^b	0.64 ± 0.87 ^a	N/d	N/d	0.47 ± 0.75 ^a	0.01 ± 0.001 ^c
Cd	0.06 ± 0.03 ^b	0.08 ± 0.06 ^a	0.06 ± 0.05 ^b	0.06 ± 0.04 ^a	N/d	N/d	0.06 ± 0.11 ^a	N/d

Notas: Para un elemento químico y tipo de acumulación, letras iguales significan concentraciones estadísticamente semejantes. N/d= no determinado. ± es la desviación estándar.

Las concentraciones superficiales promedio de cromo (Cr) más altas, ocurrió en el bosque de Chapultepec y fue de 0.34 mg kg^{-1} (Cuadro 1.2). En el bosque de Tlalpan, las concentraciones de este elemento son tan bajas que no fue posible detectarlas superficialmente, mientras que intracelularmente resultaron más bajas comparadas con las encontradas en los otros bosques (Cuadro 1.2). Estas concentraciones promedio son menores con respecto a las que encontraron Aksoy y Demirezen (2006), en *Fraxinus excelsior* de manera superficial en un parque urbano (1.70 mg kg^{-1}).

La mayor concentración superficial de Cr en Chapultepec pudiera explicarse por el origen que tiene este metal en el ambiente, el cual es producto de actividades antropogénicas como el revestimiento de metales (cromados) con fines estéticos, decoración y cambios de color de distintos materiales, así como aleaciones en los motores de los vehículos y el desgaste de los escapes (Khan *et al.*, 2008). Se considera altamente tóxico para las plantas cuando alcanza concentraciones entre $5\text{-}30 \text{ mg kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias, 2011).

El Cd tuvo los mayores depósitos promedios en el bosque de Chapultepec de manera superficial (Cuadro 1.2) este hecho podría atribuirse al igual que el Pb a las partículas suspendidas PM_{10} que se encuentran presentes en el ambiente y que como reporta la estación del SIMAT cercana a Chapultepec, están más concentradas (Figura 1.7). Además, éste mostró un efecto significativo de la interacción bosque y estación, lo cual indica que la tendencia de depósito en las épocas del año varía con el sitio.

El cadmio tiene una rápida movilidad en el ambiente, además de alta toxicidad en las plantas a bajas concentraciones (Trejo *et al.*, 2009). Probablemente, la presencia de este elemento en los bosques se puede deber a la manera en que éste llega al ambiente, a través de recipientes metálicos o galvanizados que frecuentemente se usan en actividades de jardinería y horticultura. Otra fuente provisorio de este elemento son las llantas de vehículos automotores, las cuales al desgastarse, generan pequeñas partículas de goma semejantes al polvo (Pellón *et al.*, 2005) y que pueden ser acumuladas fácilmente en los suelos y las plantas. Este proceso, se suma a la

suspensión de partículas en el ambiente, ocasionada por la dispersión y fuerza de los vientos debido a la altitud y orografía que rodea a la ZMVM (Jazcilevich *et al.*, 2003).

El Cd se considera altamente tóxico para las plantas en cantidades de 3-5 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011), sin embargo, en este estudio las concentraciones promedio de manera superficial fueron de 0.08 mg kg⁻¹ y de 0.10 mg kg⁻¹ intracelularmente para el bosque de Chapultepec, lo que indica que todavía no se alcanzan los niveles de toxicidad de este elemento. El hecho de que la concentración intracelular sea ligeramente mayor a la superficial a diferencia de la mayoría de los metales estudiados, sugiere que posiblemente el Cd se encuentre en el suelo del Bosque de Chapultepec y haya sido absorbido por las raíces y traslocado a las hojas. Se ha reportado que concentraciones muy altas de Cd (44 mg Cd kg⁻¹ peso seco) se acumularon en las hojas de *Populus tremuloides* cuando esta especie se plantó en suelos contaminados por metales (Migeon *et al.*, 2009).

El níquel (Ni) fue el único metal que se encontró depositado en mayor concentración de manera intracelular en todos los sitios a excepción del bosque de Chapultepec, en donde los depósitos mayores fueron superficiales (Cuadros 1.1 y 1.2). Quizá este metal pudo haber sido absorbido a través del suelo, ya que el Níquel de manera natural se encuentra depositado en el suelo y el agua; de manera antropogénica proviene de la quema de combustibles fósiles y emana de actividades industriales como la elaboración de baterías (Yasar *et al.*, 2010). Para explicar la mayor acumulación interna en el Parque Naucalli, se debe recordar que árboles jóvenes, tienen una mayor capacidad de absorber elementos que se encuentran en el suelo (Kabata-Pendias 2011) y el parque Naucalli fue creado en los 80's, a diferencia de los bosques de Chapultepec y de Tlalpan que son más antiguos.

En lo que respecta a las correlaciones entre las concentraciones sobre el follaje de los árboles y la distancia más cercana a las avenidas que los rodean, este efecto se observa principalmente en Cu y Zn, y en menor frecuencia en Cd y Pb.

En el Parque Naucalli la correlación Cu-Avenida Lomas Verdes en el otoño, es altamente significativa con $p= 0.001$ (cuadro 1.4); en este caso el coeficiente de

determinación explicó el 74% de la variabilidad de las concentraciones, indicando con esto que si se asumiera un gradiente lineal en promedio se esperaría encontrar que por cada 100 metros que los árboles se encuentran cercanos de esta avenida la concentración de Cu disminuye en 2.4 mg Kg^{-1} , lo cual tiene sentido ya que de acuerdo a lo observado en la figura 1.3, los vientos predominantes en esta zona para el otoño provienen del noreste y van hacia el suroeste dirección en la que se encuentra la avenida (Figura 1.2) por lo que no existe efecto de depósito por acción de la avenida. Para la correlación Cu-Boulevard Santa Cruz en la primavera (Cuadro 1.4), el coeficiente de determinación explica el 50% de la variabilidad de las concentraciones de Cu, por lo que es posible que asumiendo un gradiente lineal, en promedio por cada 100 metros de acercamiento de los árboles al Boulevard Santa Cruz, la concentración en Cu aumente 0.32 mg Kg^{-1} , este hallazgo tiene sentido ya que la dirección del viento para esta época del año (Figura 1.3) es la misma en la que se encuentra el boulevard colindando con el parque (NW), además de que la velocidad promedio es de 2.11 m/s y de acuerdo con la clasificación de vientos de Beaufort, son vientos con intensidad de brisa débil, pero con la capacidad de generar movimiento en las hojas y desarrollar remolinos suaves, por lo que es posible que el viento arrastre estas partículas del boulevard y éstas estén siendo depositadas sobre el follaje.

Por otro lado, para el bosque de Chapultepec destaca la correlación entre el Cd-Calzada de Chivatito en la primavera (Cuadro 1.4), en donde el coeficiente de determinación es del 45 % e indica que asumiendo el gradiente lineal, en promedio se esperaría que por cada 100 metros de acercamiento a la Calzada de Chivatito, la concentración de Cd aumente en 0.1 mg Kg^{-1} . Lo anterior quizás se deba a que en esta época los niveles de concentración de partículas PM_{10} suspendidas en el ambiente son altas según lo obtenido por los datos de la estación meteorológica más cercana al bosque; en promedio éstos son de $56 \mu\text{g/m}^3$ (Figura 1.6) superior a lo permisible por la NOM-025-SSA1-1993 de $50 \mu\text{g/m}^3$ por año. Este exceso en el ambiente puede estar ocasionando los depósitos sobre el follaje.

Para el Bosque de Tlalpan destaca la correlación Cd-Carretera Picacho-Ajusco en el verano, indicando que entre más alejados los árboles de esta carretera, hay menor

depósito de Cadmio sobre el follaje. De este elemento se sabe que en zonas urbanas se origina por tráfico vehicular (Nazzal *et al.*, 2014), por lo que al observar la dirección del viento en esta época del año (Figura 1.6) misma que va de NW (dirección en la que colinda con la carretera) a SE, se asume que por la ubicación de la concentración de Cd en un gradiente lineal en promedio podría disminuir 0.1 mg Kg^{-1} conforme los árboles se alejan de esta carretera. Otra correlación que destaca es en invierno para Pb-Carretera Picacho-Ajusco en donde la distancia a la avenida explicó el 51% de la variabilidad de las concentraciones de Pb, por lo que asumiendo un gradiente lineal, en promedio se espera que por cada 100 metros de acercamiento del sitio de muestreo a la carretera Picacho-Ajusco, la concentración de Pb disminuya en 2.2 mg Kg^{-1} . Este hecho quizás se deba a la dirección de los vientos en esta época del año que van de noreste a suroeste (Figura 1.5) y para esta época del año es contraria a la ubicación de la carretera Picacho Ajusco por lo que en este caso quizás los depósitos se deban a las concentraciones de partículas suspendidas en el ambiente (1.6) las cuales están por arriba de la NOM-025-SSA1-1993 ya que son en promedio de $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por año. En este caso no se consideraron las partículas de Pb que existen en el aire y que fueron obtenidas de la estación meteorológica Merced ya que el monitoreo de dichas partículas es discontinuo en promedio para este periodo se encontraron depósitos de $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bajas con respecto al promedio de $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que establece la NOM-026-SSA1-1993 para un periodo de 3 meses (Figura 1.7).

Cuadro 1-4. Correlaciones entre las concentraciones superficiales de las partículas Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd de árboles muestreados y la distancia más corta a las principales avenidas que los rodean.

Bosque	Época estacional	Metal	Avenida significativa	valor-P	R ² (%)	Coefficiente	Coefficiente * 100
Naucalli	Primavera	Cu	Boulevard Santa Cruz	0.002	50	0.032	0.32
	Verano	Zn	Avenida Lomas verdes	0.052	20	0.031	0.31
	Otoño	Cu	Avenida Lomas verdes	0.001	74	-0.024	-2.4
		Cu	Boulevard Ávila Camacho	0.019	31	0.029	2.9
	Invierno	Cu	Boulevard Santa Cruz	0.056	20	0.014	1.4
		Zn	Avenida Lomas Verdes	0.006	41	-0.012	-1.2
		Cu	Avenida Lomas Verdes	0.018	31	-0.009	-0.9
		Cu	Boulevard Santa Cruz	0.027	27	0.009	0.9
		Cu	Misiones	0.021	30	0.008	0.8
		Zn	Misiones	0.034	25	0.010	1.0
Chapultepec	Primavera	Cd	Calzada de Chivatito	0.004	45	0.001	0.1
	Otoño	Zn	Avenida Constituyentes	0.073	17	-0.006	-0.6
		Cu	Avenida Chapultepec	0.057	23	0.024	2.4
	Invierno	Pb	Calzada de Chivatito	0.091	20	-0.013	-0.1
Tlalpan	Primavera	Zn	Avenida Paseo del Pedregal	0.077	16	0.021	2.1
		Zn	Zacatepetl	0.077	16	0.021	2.1
	Verano	Cu	Avenida Corregidora	0.045	22	0.015	1.5
		Zn	Carretera Picacho-Ajusco	0.040	23	0.093	9.3
	Otoño	Cd	Carretera Picacho-Ajusco	0.014	39	-0.001	-0.1
		Cu	Avenida Corregidora	0.038	24	-0.004	0.4
	Invierno	Pb	Carretera Picacho-Ajusco	0.072	51	-0.022	2.2

Para las rosas de los vientos elaboradas con el software WRPLOT View Freeware Wind rose plots versión 7 (Figuras 1.3-1.5), se observó que los vientos predominantes son del NW la mayor parte del año en el parque Naucalli y el bosque de Tlalpan, mientras que para Chapultepec predomina la dirección SW. En cuanto a la velocidad, en todos los casos se definen como vientos en calma (brisa muy débil) según la escala de Beaufort modificada para tierra.

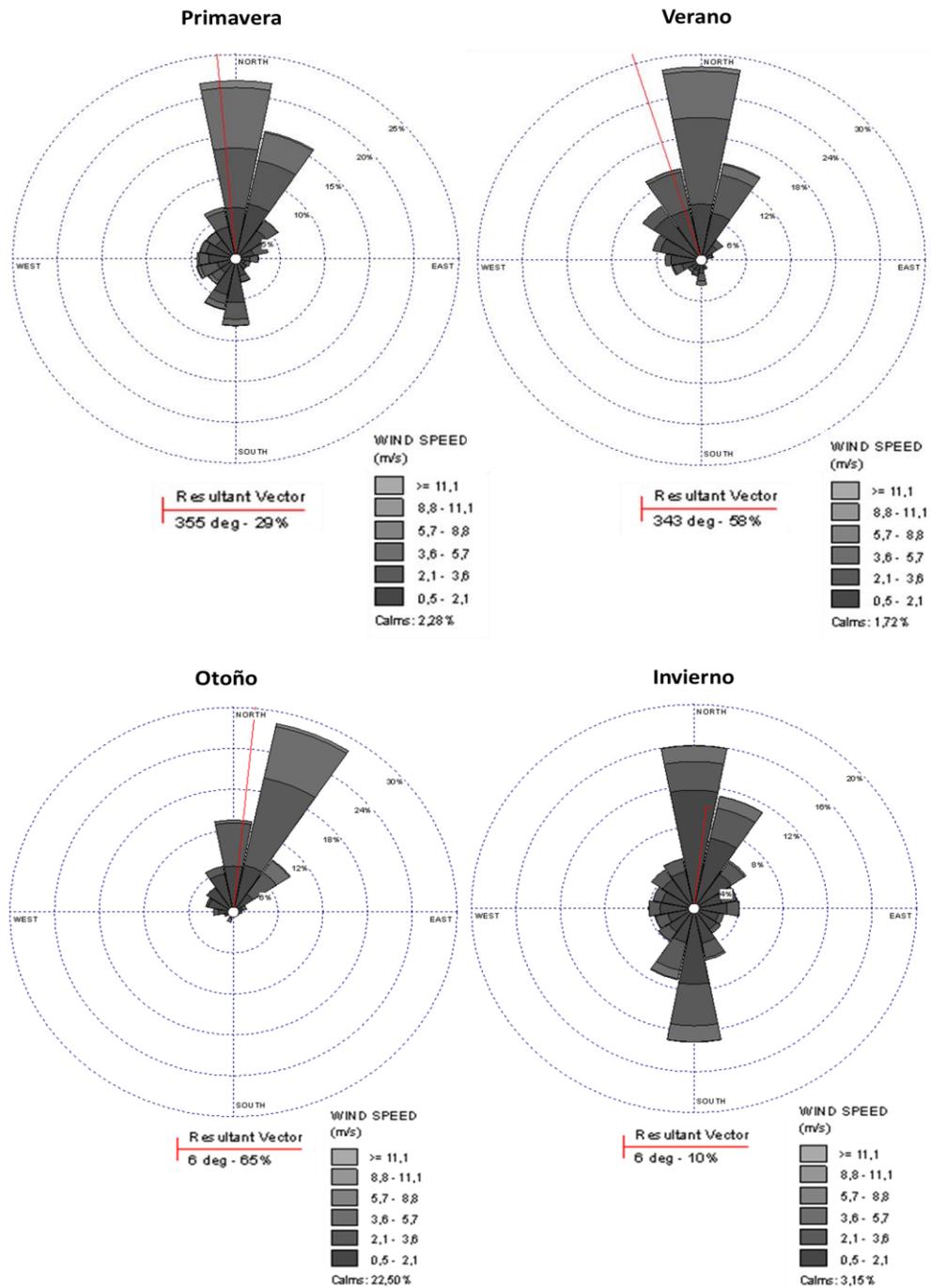


Figura 1.3. Dirección y velocidad del viento para el parque Naucalli.

Nota: La línea roja se refiere al vector resultante predominante y explica la dirección del viento y la predominancia de los ángulos en porcentaje que definieron dicha dirección. La coloración en tonos grises indica la velocidad del viento los cuales se definieron en todos los casos según la escala de Beaufort modificada para tierra como Flojito de brisa débil con velocidades de 1.6-3.3 m/s.

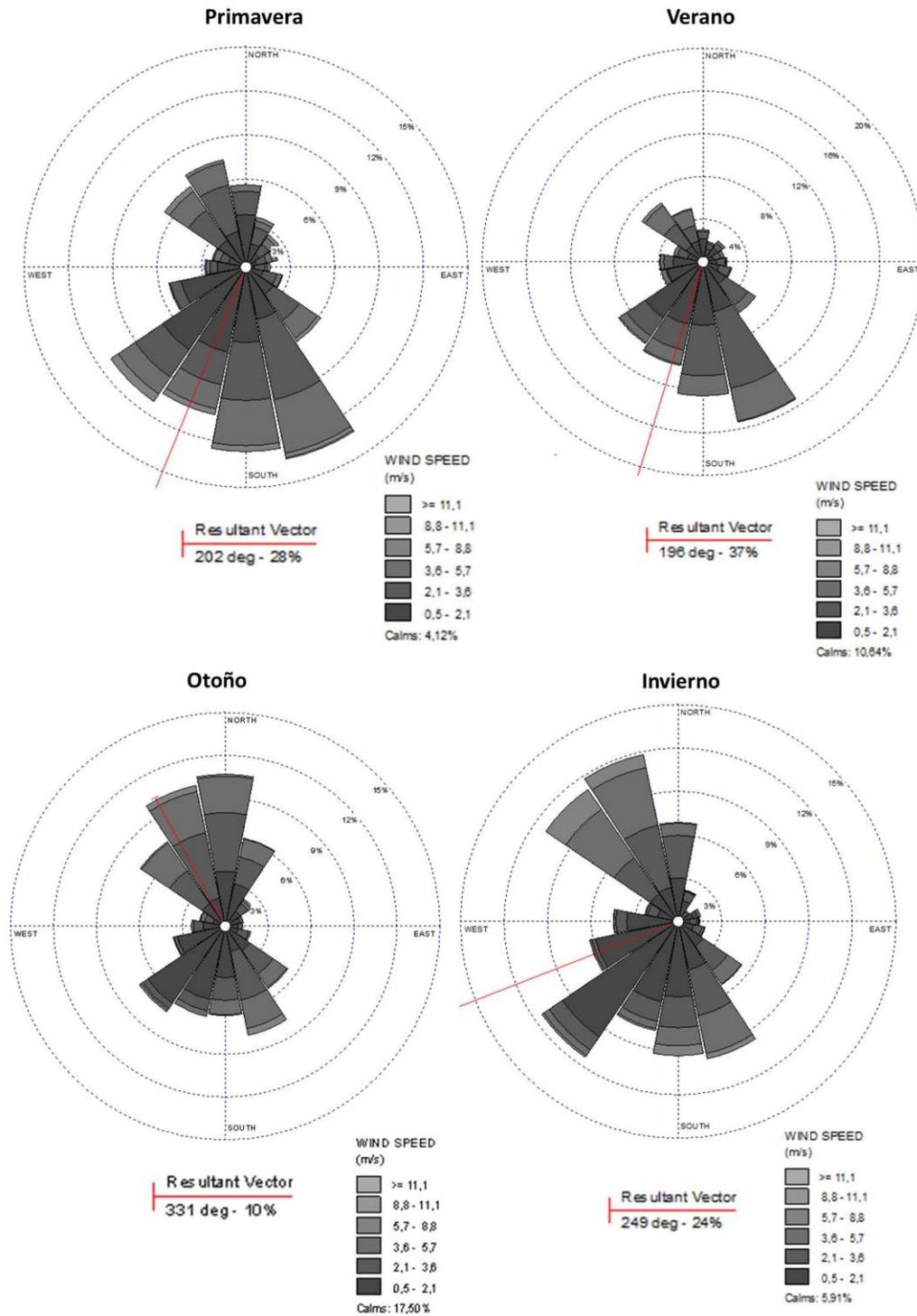


Figura 1.4. Dirección y velocidad del viento para el Bosque de Chapultepec.

Nota: La línea roja se refiere al vector resultante predominante y explica la dirección del viento y la predominancia de los ángulos en porcentaje que definieron dicha dirección. La coloración en tonos grises indica la velocidad del viento los cuales se definieron en todos los casos según la escala de Beaufort modificada para tierra como Flojito de brisa débil con velocidades de 1.6-3.3 m/s.

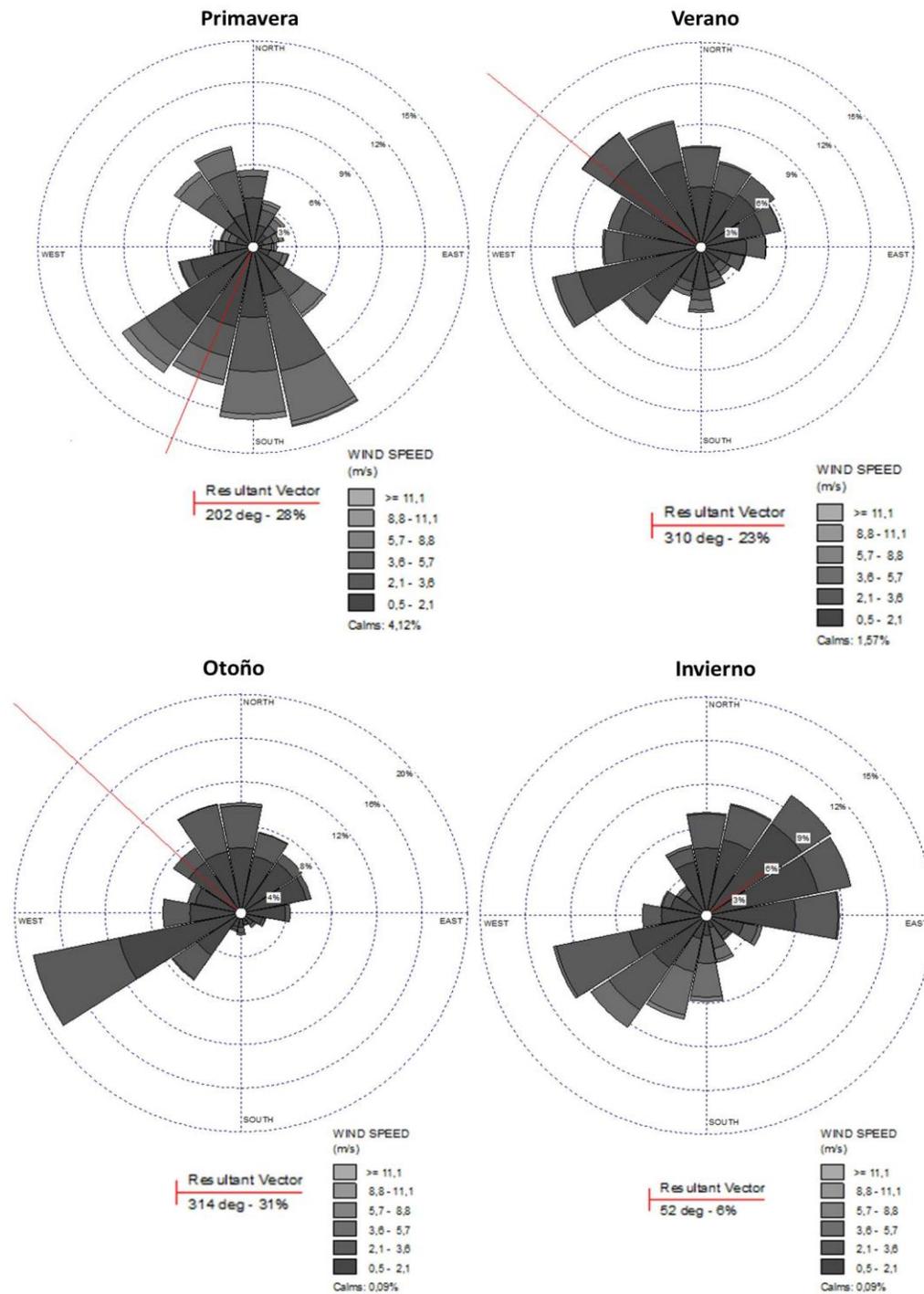


Figura 1.5. Dirección y velocidad del viento para el Bosque de Tlalpan.

Nota: La línea roja se refiere al vector resultante predominante y explica la dirección del viento y la predominancia de los ángulos en porcentaje que definieron dicha dirección. La coloración en tonos grises indica la velocidad del viento los cuales se definieron en todos los casos según la escala de Beaufort modificada para tierra como Flojito de brisa débil con velocidades de 1.6-3.3 m/s.

Las concentraciones promedio de partículas suspendidas en el aire PM₁₀ reportadas por las estaciones de monitoreo del SIMAT se muestran en la Figura 1.6. Se observó que en la mayor parte del año están por debajo de lo que establece la NOM-025-SSA1-1993, la cual recomienda un máximo de 50 µg/m³ por año, sin embargo en los periodos de primavera e invierno el bosque de Chapultepec presentó concentraciones altas, reportando una concentración promedio anual de 49 µg/m³, casi el límite de la máxima permisible. Los resultados concuerdan con lo reportado por Vázquez *et al.*, (2009) quienes reportan que la estación Merced tiene concentraciones altas de partículas suspendidas en el aire de tamaño PM₁₀ influenciada fuertemente por el uso de suelo, la actividad antropogénica y la época del año.

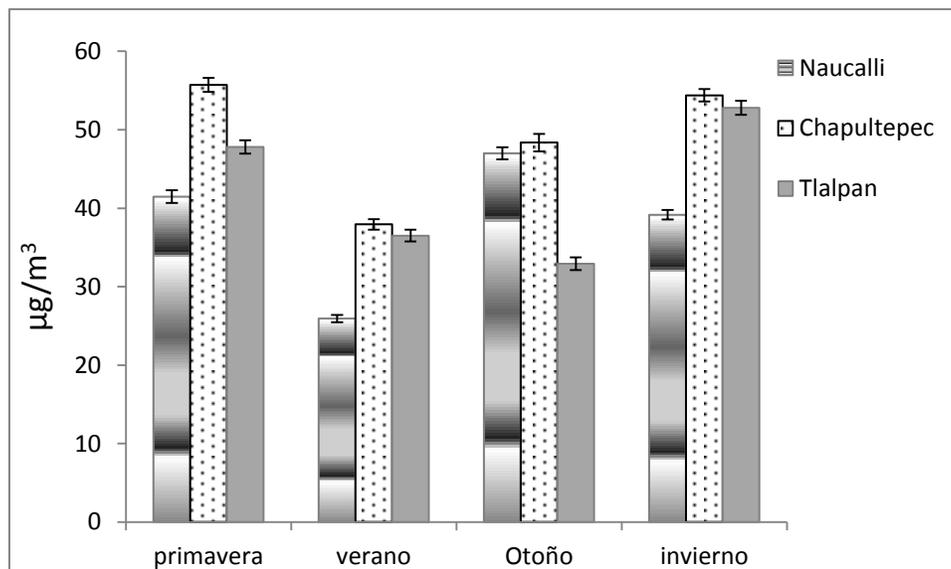


Figura 1.6. Concentraciones de Partículas suspendidas en el aire de tamaño PM₁₀ obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México cercanas al Parque Nacualli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.

Las concentraciones promedio de partículas suspendidas en el aire Pb reportadas por las estaciones de monitoreo del SIMAT se muestran en la Figura 1.7. Se observó que en la mayor parte del año están por debajo de lo que establece la NOM-026-SSA1-1993, la cual recomienda un máximo de 1.5 µg/m³ en un tiempo de tres meses, en este caso las concentraciones obtenidas por la estación de monitoreo fueron inconsistentes

principalmente para el bosque de Chapultepec, por lo que estos datos pudieran no ser considerados como verídicos.

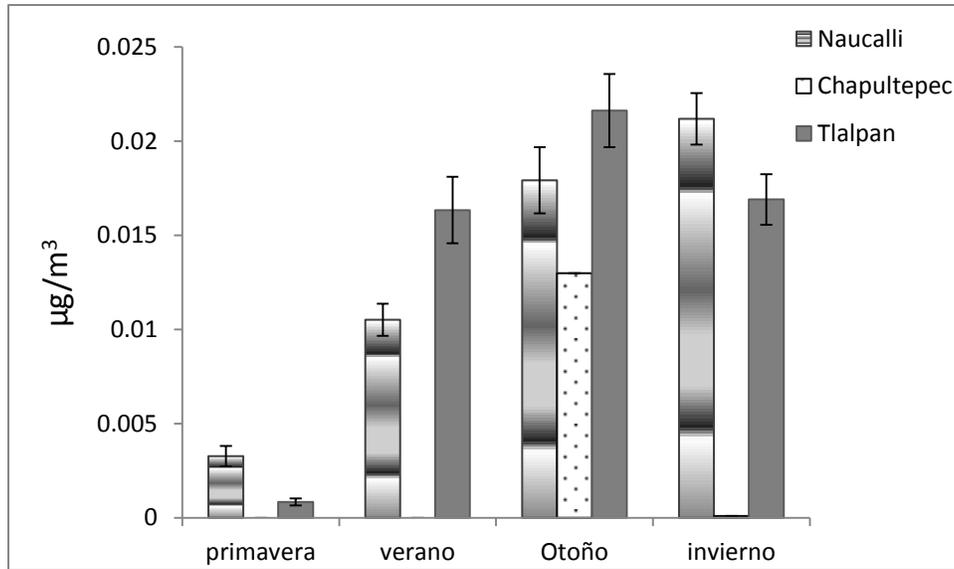


Figura 1.7. Concentraciones de partículas de Pb suspendidas en el aire obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la ciudad de México cercanas al Parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.

Nota: para el caso del bosque de Chapultepec no existe un monitoreo continuo de partículas por lo que los reportes se encuentran sin información.

La lámina de precipitación reportada por las estaciones de monitoreo de la CONAGUA para el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan se muestran en la Figura 1.8. En general se observó que la lamina fue muy baja en todos los casos, sin embargo existen estudios que reportan que los contaminantes atmosféricos presentes en la lluvia son los mismos que se encuentran en atmósfera cercana al sitio de colección y que predominan sustancias como amonio, potasio, magnesio, nitrato, nitrito y sulfato (Rubio et al., 2001), por lo que algunas de las partículas como Ni y K encontradas en este estudio pudieron haber sido consecuencia de deposición por lluvia.

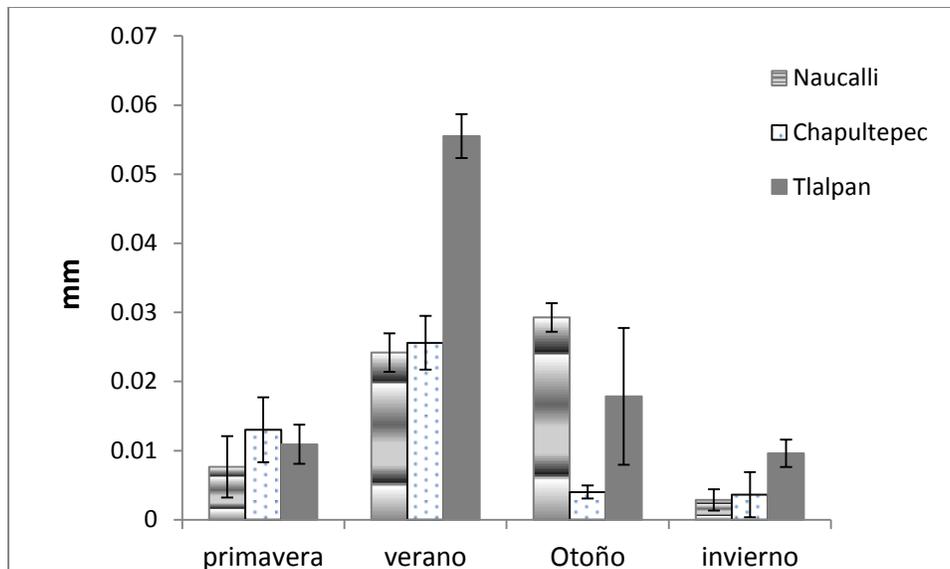


Figura 1.8. Precipitación promedio anual para el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan, periodo otoño invierno 2011 y primavera y verano 2012.

Gráficamente se observaron diferencias entre las concentraciones superficiales e intracelulares en los tres bosques. Al someter el follaje a un lavado, como se hizo en este estudio, se perdieron metales por acción del ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), el cual se usó como un agente quelante para formar complejos con metales (Byegard *et al.*, 1999, Olgún *et al.*, 2005, Núñez-López *et al.*, 2008, Pazos *et al.*, 2009,). En general, las concentraciones superficiales fueron mayores que las intracelulares, salvo el caso Níquel (Figura 1.9b).

Las tendencias mostradas en la Figura 1.3 (a y b), indican que existen cambios en el depósito de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd según el bosque y la época estacional; es decir, el comportamiento de las concentraciones superficiales e intracelulares es diferente entre los bosques estudiados. Las concentraciones superficiales de la mayoría de los elementos, excepto el Zn, fueron menores en el bosque de Tlalpan, probablemente por su lejanía a las principales zonas industriales, localizadas en la zona norte del Valle de México.

Haciendo el análisis del depósito de las partículas de los mismos metales por época estacional (Figura 1.9 c y d), se observa nuevamente que las concentraciones de los

elementos son mayores superficialmente que intracelularmente, a excepción del níquel el cual se encuentra en mayor concentración promedio internamente durante el verano. En general se observó que en el verano las concentraciones promedio de manera interna fueron más altas, justo cuando existe un mayor movimiento de traslocación en las plantas. Tanto de manera superficial como intracelular se observaron dos tendencias primavera-verano cuando el follaje es joven y otoño-invierno cuando el follaje es senescente (Figura 1.9c y 1.9d).

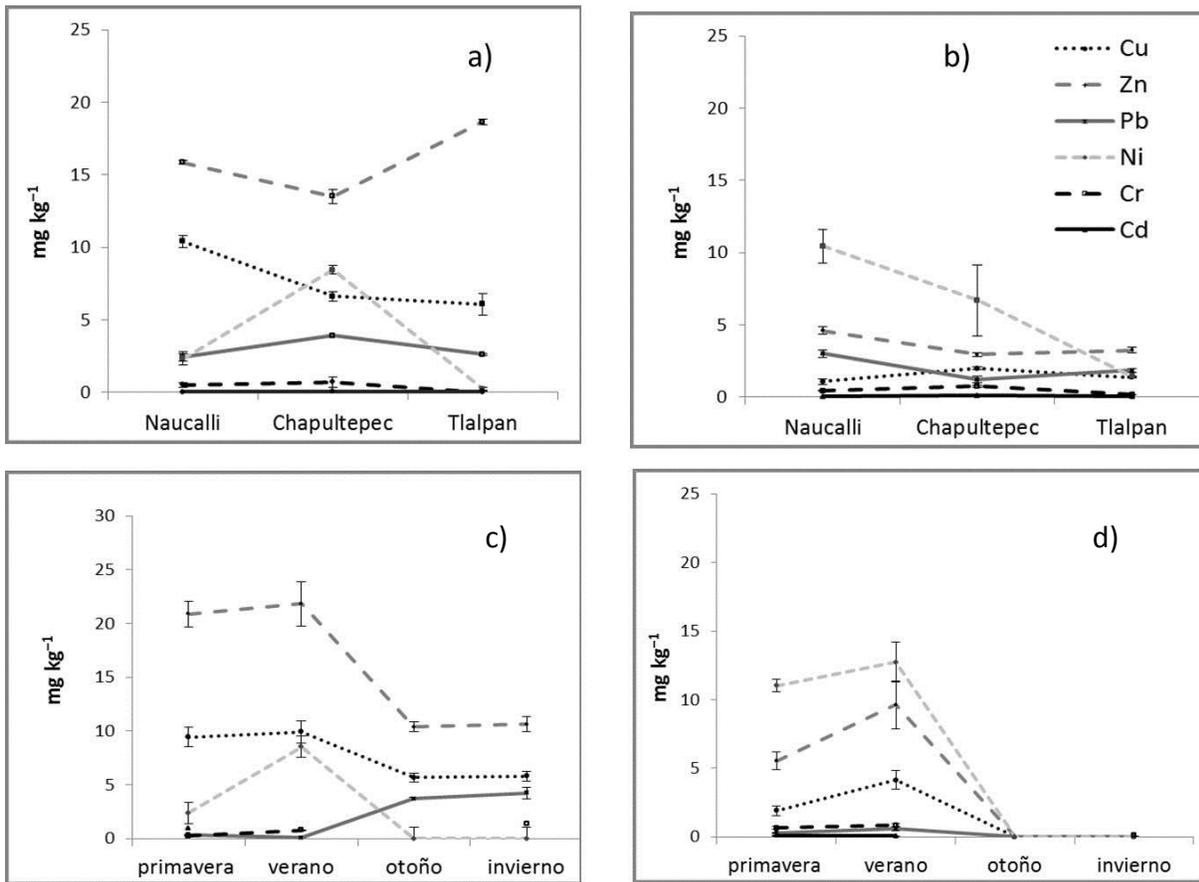


Figura 1.9. Concentraciones a) superficiales y b) intracelulares promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, y Cd. en Parque Naucalli y los Bosques Chapultepec y Tlalpan, y concentraciones c) superficiales y d) intracelulares de los mismos contaminantes en las cuatro estaciones del año.

1.6 Conclusiones

Las concentraciones superficiales de Cu, Zn, Pb, Cr y Cd en *Fraxinus uhdei* (Wenz.) siempre fueron al menos 50% mayores que las concentraciones intracelulares arriba.

Se determinaron concentraciones de Pb, Cr y Cd elementos no esenciales para las plantas, tanto de manera superficial como intracelular.

Los depósitos superficiales más altos de Pb, Cr y Cd se registraron en el Bosque de Chapultepec.

El Pb y Cd presentaron los valores de concentración más altos en la época invernal, justo cuando los niveles de contaminación atmosférica aumentan.

Los niveles de depósito de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd hallados están dentro de los rangos no tóxicos para las plantas.

Se observó que en algunos casos existe una correlación entre la concentración superficial de las partículas de Cu, Pb y Cd depositadas en el follaje de árboles y la distancia a algunas de las avenidas que los rodean influenciados por la dirección y velocidad de los vientos como en primavera para parque Naucalli correlación Cu-Boulevard Santa Cruz; verano bosque de Chapultepec correlación Cd-Calzada de Chivatito; verano correlación Cd-Carretera Picacho Ajusco y Pb-Carretera Picacho Ajusco en invierno para el bosque de Tlalpan.

1.7 Literatura citada

- Aksoy A. y Demirezen D. 2006. *Fraxinus excelsior* as a Biomonitor of Heavy Metal Pollution. Pol. J. Environ. Stud. 15, 27-33.
- Alcalá J., Sosa M., Moreno M., Quintana C., Campos A. y Holguín C. 2008a. Retención de polvo atmosférico en especies arbóreas indicadoras de la planeación urbana sustentable: Ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 17, 17-28.
- Alcalá J., Sosa M., Moreno M., Quintana G., Miranda S. y Rubio A. 2008b. Metales Pesados en Vegetación Arbórea como Indicador de la Calidad Ambiental Urbana: Ciudad de Chihuahua, México. *Multequina* 17, 39-54.
- Al-Shayeb S.M., Seaward M. R.D. y Al-Rajhi M.A. 1995. The date palm (*Phoenix dactylifera* L.) as a biomonitor of lead and other elements in arid environments. *The Sci. Total Environ.* 168, 23-30.
- Beckett K. P., Freer-Smith, P.H. y Taylor G. 2000. Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and windspeed. *Glob. Change Biol.* 6, 995–1003.
- Benavides M. H.M., López M. R. y Flores H. J. 2002. Daños a banquetas por arbolado de alineación establecido en cepas en la delegación Coyoacán, Distrito Federal. *Rev. Cien. For. en Mex.* 27, 53-77.
- Byegard J., Skarnemark G. y Skhlberg M. 1999. The stability of some metal EDTA, DTPA and DOTA complexes: Application as tracers in groundwater studies. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 241, 281-290.
- Campos G. I., Alcaraz, E. F., Herrera M., Sosa J., Jimenez M., Delgado E. y Ramirez S. 2007. Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 3, 44-51.
- Catinon M., Ayrault S., Daudin L., Sevin L., Asta J., Tissut M. y Ravanel P. 2008. Atmospheric inorganic contaminants and their distribution inside stem tissues of *Fraxinus excelsior* L. *Atmos. Environ.* 42, 1223–1238.

- Celis J .E., Morales, J. R., Zaror, C. A. y Carvacho, O. F. 2007. Contaminación del Aire Atmosférico por Material Particulado en una Ciudad Intermedia: El caso de Chillán (Chile). *Inf. Tecnol.* 18, 49-58.
- Dalmasso A., Canadía R. y Llera J. 1997. La vegetación como indicadora de la contaminación del polvo atmosférico. *Multequina* 6,91-97.
- De la Maza C. L., Rodríguez M., Hernández J., Serra M. T., Gutiérrez P., Escobedo F., Nowak D., Prendez M., Aray J. y Varnero M. T. 2005. Silvicultura urbana: Vegetación urbana como factor de descontaminación. *Chile Forestal* 313, 46-49.
- Escala de Beaufort [en línea]. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [fecha de consulta: 03 enero 2015]. Disponible desde Internet: <http://sinaica.inecc.gob.mx/descargas/escala-beaufort.pdf>
- Escobedo F. y Chacalo, A. 2008. Estimación Preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la ciudad de México. *Interciencia* 33, 29-33.
- Escobedo F.J., Wagner J., Nowak D.J., De la Maza C.L., Rodríguez M. y Crane D.E. 2008. Analyzing the cost-effectiveness of Santiago Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *J. Environ Manage.* 86, 148-157.
- de Bauer, L. I. 1972. Uso de plantas indicadoras de aeropoluantes en la Ciudad de México. *Agrociencia* 9, 139-41.
- Gutiérrez Martínez, P. B. 2013. Acumulación de contaminantes en especies vegetales en la Zona Metropolitana de Guadalajara (Tesis de Licenciatura). Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Accedido el 14 de diciembre, 2014, desde: http://biblioteca.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5561/Gutierrez_Martinez_Paulina_Beatriz.pdf?sequence=1
- Guzmán Rosas A.A. y Ocampo C. L.M. 2011. Evaluación de la Resistencia a la corrosión del sistema primer epóxico rico en Zinc/acabado Polisiloxano por medio de espectroscopía de impedancia electroquímica. *Dyna* 78, 87-95.
- Jazcilevich, A. D., Garcia, A. R. y Ruíz-Suárez, L.G. (2003). A study of air flow patterns affecting pollutant concentrations in the Central Region of Mexico. *Atmos. Environ.* 37, 183-193.

- Jáuregui E. 1958. El aumento de la turbiedad del aire en la Ciudad de México. *Revista Ingeniería Hidráulica en México*. 4, 77-81.
- Jáuregui, E. 1989. The dust storms of Mexico City. *Int. J. Climatol.* 9, 169-180.
- Kabata-Pendias A. 2011. Trace elements in soils and plants. 4rd ed. CRC Press. Boca Raton, FL.(USA). 505 pp.
- Khan S.A., Khan L., Hussain I., Shah H. y Akhtar N. 2008. Comparative assessment of heavy metals in *Euphorbia helioscopia* L. *Pak. J. Weed Sci. Res.* 14, 91-100.
- Kohert R. J., Amundsun R. G. y Lawrence, J. A. 1986. *Environ. Pollut.* 41, 219–234.
- Lee E.H., Bennat J.H. y Heggstad H.E. 1981. Retardation of Senescence in red Clover Leaf Discs by a New Antiozonant, N-[2-(2-Oxo-1-imidazolidinyl)ethyl]-N'-phenylurea. *Plant Physiol.* 67, 347–350.
- Mahmud Z. A., Míngolo N. y Gordillo, G. 2010. Efecto de la Textura de Electro depósitos de Zinc en acero sobre su resistencia a la Corrosión. *Avances en Ciencias e Ingeniería* 1, 15-25.
- Meza M de L., Quintero M., García R. y Ramírez, J. 2010. Estimación de Factores de Emisión de PM10 y PM2.5, en Vías Urbanas en Mexicali, Baja California, México. *Información Tecnológica.* 21, 45-56.
- Migeon A., Richaud P., Guinet F., Chalot, M. y Blaudez D. 2009. Metal accumulation by woody species on contaminated sites in the north of France. *Water Air Soil Poll.* 204, 89-101.
- Murray K.S., Rogers D.T. y Kaufman, M. 2004. Heavy Metals in an Urban Watershed in Southeastern Michigan. *J. Environ. Qual.* 33,163-172.
- Nazzal Y., Ghrefatl H. y Rosen M.A. 2014. Heavy Metal Contamination of Roadside Dust: a Case Study for Selected Highways of the Greater Toronto Área, Canada Involving Multivariate Geostatistic. *Res. J. of Environ. Sci.* 8, 259-273.
- Núñez-López R.A., Meas Y., Gama S.C., Ortega- Borges R. y Olguín E.J. 2008. Leaching of lead by ammonium salts and EDTA from *Salvinia minima* biomass produced during aquatic phytoremediation. *J. Hazard. Mater.* 154, 623-632.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, partículas de 10 micras (PM10). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (Diario Oficial de la Federación), lunes 26 de septiembre de 2005. Accedido el 21 de diciembre de 2014 desde: <http://www.aire.df.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-025-SSA1-1993.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, plomo (pb). Valor permisible para la concentración de plomo en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. . (Diario Oficial de la Federación), lunes 26 de septiembre de 2005. Accedido el 21 de diciembre de 2014 desde:

<https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cofepris.gob.mx%2FMIJ%2FDocuments%2FNormas%2F026ssa1.pdf&ei=vyyKVJ3VEtH4yQT-pYKgCA&usg=AFQjCNFTHf4z8CbnZjhaXzi3IYh-yLKsPQ&bvm=bv.84607526,d.aWw>

Nowak D. J., Crane D.E. y Stevens J.C. 2006. Air pollution removal by urban trees in the United States. *Urban For. Urban Gree.* 4, 115-123.

Olguín E.J., Sánchez-Galván G., Pérez-Pérez T. y Pérez-Orozco A. 2005. Surface adsorption, intracellular accumulation and compartmentalization of Pb (II) in batch operated lagoons with *Salvinia minima* as affected by environmental conditions, EDTA and nutrients. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 32, 577–586.

Pagotto C., Rémy N., Legret M. y Le Cloirec P. 2010. Heavy Metal Pollution of Road Dust and Roadside Soil near a Major Rural Highway. *Environ Technol.* 22, 307-319.

Pazos D., Pineda-Arellano A., Antonio C. y Silva- Martínez, S. 2009. Degradación del AEDT y los complejos Cu(II)-AEDT y Cr(III)-AEDT mediante los procesos Feton y Foto-Feton asistidos con radiación solar en soluciones acuosas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 25, 239-246

- Pellón A., Frades J., Chacón A., Pérez E., Oña A., Espinosa M.C. Ramos A.C., Mayarí R. y Escobedo R., 2005. Eliminación de cromo y cadmio mediante *Scenedesmus obliquus* en estado inmovilizado. *Revista CENIC Ciencias Químicas* 36, 175-180.
- Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R. y Polle A. 2010. Influence of Environmental Pollution on Leaf Properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. *Bull Environ Contam Toxicol.* 85, 251-255.
- Trejo-Calzada R., Esquivel A.O., Pedroza S.A., Arreola A.J.G., Flores H.A., Ruiz T.J. y Valdéz C.R. 2009. Evaluación de trompillo (*Solanum elaeagnifolium*) en la Fitoextracción de Plomo y Cadmio en suelos contaminados. *Rev. Chapingo. serie zonas áridas.* 8, 247-253.
- Tzvetkova N. y Kolarov D. (1996). Effect of air pollution on Carbohicrate and Nutrients Concentration in some deciduos tree species. *Plant Physiol.* 22, 53-63.
- Vives A.E.S., Moreira S., Brieza S.M.B., Madeiros J.G.S., Tomazello Filho M., Zucchi O. L.A.D., y Filho V. F.N. 2006. Monitoring of the environmental pollution by trace element analysis in tree-rings using synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescenc. *Spectrochim Acta B.* 61, 1170-1174.
- Wahlin P., Berkowicz R. y Palmgren F. 2006. Characterisation of traffic-generated particulate matter in Copenhagen. *Atmospheric Environment* 40, 2151–2159
- Wang Y. Huang K., Li C., Mi H., Luoc J., y Tsai P. 2003. Emissions of fuel metals content from a diesel vehicle engine. *Atmos. Environ.* 37, 4637–4643.
- Yasar U., Ozyigit I. y Serin M. 2010. Judas tree (*Cercis siliquastrum* L. subsp. *siliquastrum*) as a posible biomonitor for Cr, Fe and Ni in Istanbul (Turkey). *Rom. Biotech. Lett.* 15, 4979-4989.
- Zambrano García A., Medina Coyotzin C., Rojas Amaro A., López Veneroni D., Chang Martínez L., y Sosa Iglesias G. 2009. Distribution and sources of bioaccumulative air pollutants at Mezquital Valley, Mexico, as reflected by the atmospheric plant *Tillandsia recurvata* L. *Atmos. Chem. Phys.* 9, 6479-6494.
- Zurayk R., Sukkariah B. y Baalbaki R. 2001. Common Hydrophytes as Bioindicators of Nickel, Chromium and Cadmium Pollution. *Water Air Soil Poll.* 127, 373- 378.

CAPÍTULO 2. DIÁMETRO DEL TRONCO Y ÁREA FOLIAR DE *Fraxinus uhdei* (Wenz.) EN RESPUESTA A DEPÓSITOS SUPERFICIALES E INTRACELULARES DE PARTÍCULAS ATMÓSFERICAS EN BOSQUES URBANOS DEL VALLE DE MÉXICO.

2.1 Resumen

La vegetación en ambientes urbanos padece en mayor o menor grado los efectos que la contaminación atmosférica le ocasiona. En este trabajo se evaluaron los efectos que tienen los depósitos superficiales y las concentraciones intracelulares del Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Cromo (Cr), Cobalto (Co), Cadmio (Cd), Nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y el pH del suelo, sobre las siguientes características del follaje: área foliar, área foliar específica (AFE), el peso seco para 100 hojas y el incremento en diámetro a la altura del pecho (DAP) de árboles de la especie *Fraxinus uhdei* ubicados en tres bosques urbanos de la Zona metropolitana del Valle de México (ZMVM): Parque Naucalli, bosque de Chapultepec y bosque de Tlalpan.

Se realizaron modelos de regresión múltiple a través del paquete estadístico Minitab® con el procedimiento Stepwise para determinar qué metales y elementos tienen alguna relación con las variables de respuesta mencionadas por bosque urbano y época estacional. Para la interpretación de los modelos obtenidos se asumió que existía una relación causa-efecto entre las variables del árbol y los contaminantes, aunque dicha suposición puede no ser válida del todo válida. Los resultados obtenidos en este trabajo pudieran ser en un futuro una base de partida importante para otros estudios.

Entre los resultados más destacados, se encontró que el bosque de Tlalpan en el otoño mostró una relación causa-efecto para área foliar, área foliar específica, peso seco de hojas e incremento en el diámetro a la altura del pecho con respecto a potasio, cadmio, zinc y pH del suelo.

En primavera, otoño e invierno, potasio (K), cobre (Cu), zinc (Zn) y cromo (Cr) tuvieron alguna relación causa-efecto, mientras que verano fue la única época del año en la que no se observaron cambios sobre el follaje y el incremento en diámetro. Se observó también que el área foliar, área foliar específica, el peso de hojas y el diámetro cambian según el parque urbano de acuerdo al estadístico *Kruskal Wallis*

Además, se realizó un diagnóstico nutricional de nitrógeno(N) fósforo (P) y potasio (K), encontrándose que estos macro elementos también cambian según el bosque urbano; en general el parque Naucalli presentó las mayores concentraciones de N y P, mientras que en Tlalpan de K.

Palabras clave: crecimiento arbóreo, metales pesados, estado nutricional,Fresno.

**CHAPTER 2. TRUNK DIAMETER AND LEAF AREA FROM *Fraxinus uhdei* (Wenz.)
IN RESPONSE TO THE SURFACE DEPOSITS AND INTRACELLULAR
ATMOSPHERIC PARTICLES PM₁₀ IN URBAN FOREST IN THE VALLEY OF
MEXICO.**

2.2 Abstract

The vegetation in urban environments is affected on greater or smaller degree by the effects of air pollution. In this paper the effects of superficial deposits and the intracellular concentrations of the following elements were evaluated: copper (Cu), Zinc (Zn), lead (Pb), Nickel (Ni), chromium (Cr), cobalt (Co), Cadmium (Cd), Nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and soil pH, on the following characteristics of the foliage: leaf area, specific leaf area (SLA), dry weight of 100 leaves and the increase in diameter at breast height (DBH) of tree species of *Fraxinus uhdei* (Wenz.) which are located in three metropolitan urban forests in Zone of Mexico City (ZMVM): Naucalli Park, Chapultepec Forest and Tlalpan Forest.

Multiple regression models were performed through the statistical package Minitab® with the Stepwise procedure in order to determine which metals and elements had an effect on these variables per urban forest and season; for the interpretation of the obtained models, it was assumed that there was a cause-effect relationship between the variables of the tree and the contaminants. Although such supposition it is not totally valid, the results could be a starting point for further studies.

In the results, it was found that Tlalpan forest during autumn showed a cause-effect relationship for foliar area, specific leaf area, leaf dry weight and increase in diameter at breast height because of potassium, cadmium, zinc, and soil pH.

During spring, autumn and winter, potassium (K), copper (Cu), zinc (Zn) and chromium (Cr) have some cause-effect relationship whereas summer was the only season in which no changes were observed on foliage and the increase in diameter. It was also observed that the leaf area, specific leaf area, leaves dry weight and the increase in diameter at breast height change depending on the urban forest and according to the *Kruskal wallis* statistical.

In addition, a nutritional diagnosis of nitrogen (N) phosphorus (P) and potassium (K) was carried out. It was found that these macro elements also change according to the urban forest. Naucalli Park had the highest concentrations of N and P, while Tlalpan Forrest had potassium.

Keywords: tree growth, heavy metals, nutritional status,ash.

2.3 Introducción

Las partículas o material particulado (PM) cuyo término proviene del inglés *Particulate Matter*, están compuestas de partículas finas y gruesas que se encuentran suspendidas y dispersas en el aire. Éstas varían en términos de su composición química, morfología y propiedades ópticas, siendo el diámetro de las partículas su propiedad más importante, ya que existen partículas nanométricas y submicrométricas, así como la aglomeración de otras partículas de mayor diámetro, denominadas finas (1-2.5 μm) y gruesas (> 2.5 μm) (Sosa *et al.*, 2012). Se denomina como PM₁₀ a las partículas con diámetros iguales o inferiores a 10 μm (Campos *et al.*, 2007). Las PM₁₀ están formadas por polvo, líquidos y metales que llegan a ser tóxicos para las plantas, ya que, en exceso inhiben el crecimiento y producen toxicidad en las células vegetales llegando en algunos casos a provocar la muerte (vanAssche y Clijsters, 1986; Steffens, 1990).

La vegetación urbana reduce la concentración del polvo en el ambiente, actuando como sumidero de los contaminantes que se encuentran contenidos en el aire (Uzma *et al.*, 2013). Las ramas, corteza y el follaje de las plantas contribuyen a la captura de las partículas (Samal y Santra, 2002) ocasionando con ello daño a la morfología interna y estructura de las hojas además de oclusión de estomas y disminución de la tasa de fotosíntesis (Farooq, *et al.*, 2000, Pourkhabbaz *et al.*, 2010, Sukumaran, 2012), clorosis ocasionada (Seyyednejad, *et al.*, 2011), exceso de producción de ácido ascórbico y disminución de la transpiración (Prajapati y Tripathi, 2008, Sharifi *et al.*, 1997), por lo que es necesario considerar especies resistentes o tolerantes a ambientes urbanos, ya que los depósitos de partículas en la superficie de las plantas se ve influida por una variedad de factores.

Aparte del diámetro y forma de las partículas, también los parámetros meteorológicos: humedad y la velocidad del viento, así como las fuentes emisoras que rodean a la vegetación, influyen en la retención de las partículas (Litschke y Kuttler, 2008).

La contaminación atmosférica en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es muy elevada durante el año (de Bauer *et al.*, 2006, Escobedo y Chacalo 2008) Se han

realizado trabajos que reportan la influencia y el daño que ésta ocasiona a la vegetación (de Bauer *et al.*, 2000, Alvarado-Rosales y Hernández-Tejeda, 2002, Bravo-Álvarez y Torres-Jardón 2002, Vega *et al.*, 2010), por lo que el propósito de este estudio fue el determinar el comportamiento que tienen el área foliar, área foliar específica, peso seco de 100 hojas, e incremento en diámetro, en función de los depósitos superficiales e intracelulares de los elementos Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co, Cd y la concentración de N, P y K, así como el pH del suelo, en follaje de árboles de *Fraxinus uhdei* (Wenz) durante el año 2012.

La selección de esta especie se basó en que cerca del 80% del arbolado urbano en la Ciudad de México está compuesto por los géneros *Fraxinus* y *Ligustrum* (Benavides *et al.*, 2002). Sin embargo no existen datos sobre los efectos que los elementos bajo estudio puedan tener sobre las variables del follaje y el crecimiento de los árboles

2.4 Materiales y Métodos

2.4.1. Área de estudio

El estudio se realizó en tres bosques urbanos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). Parque Naucalli, localizado al norte en las coordenadas 19° 29' 27.6" N, 99° 14' 21.2" W; bosque de Chapultepec, ubicado al poniente de la Ciudad de México a los 19° 23' 40" y 19° 25' 45" de N y 99° 10' 40" y 99° 14' 15" W y el bosque de Tlalpan, localizado en el sur a los 19° 17' 38.2" N, 99° 11' 36.3" W (Figura 2.1).

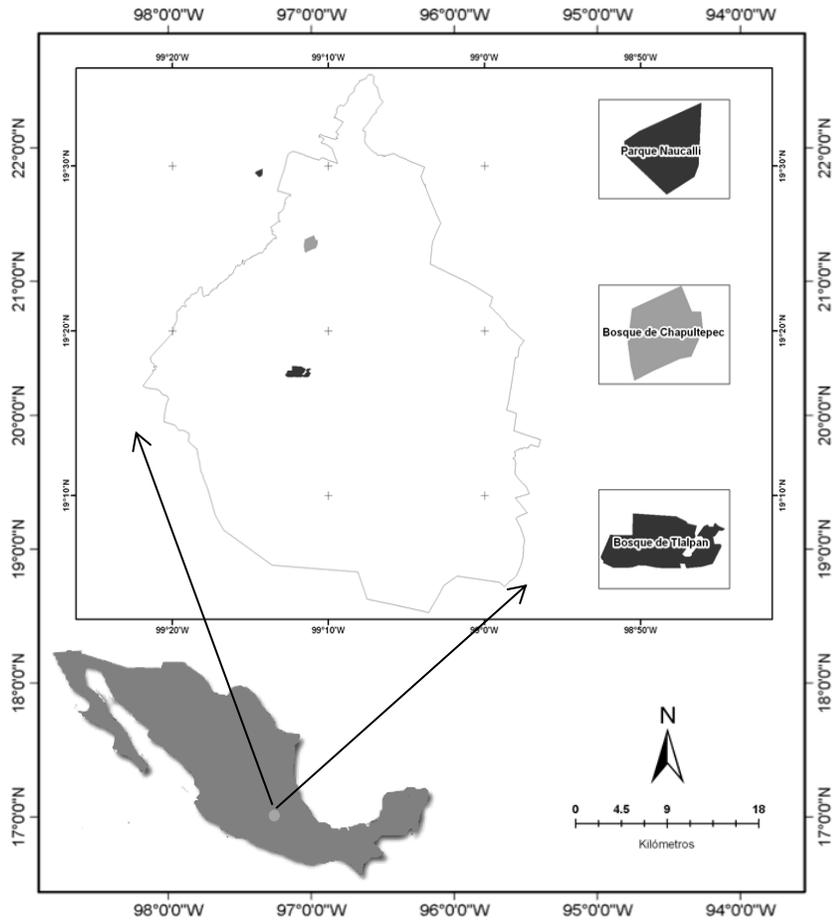


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Se colectaron hojas ubicadas a una altura de 7 metros sobre el nivel del suelo con ayuda de una garrocha adaptada con una tijera para podar, una vez por estación y durante un año, en los tres bosques. La recolección de hojas se hizo para 45 árboles de la especie *Fraxinus uhdei* (Wenz.) distribuidos equitativamente en los tres bosques urbanos. Se definió en un transecto por bosque, procurando un espaciado de 50 m entre árboles y se consideraron las condiciones particulares de cada bosque, tales como distribución de la especie, obstáculos y avenidas circundantes. Se procuró que la muestra de hojas fuera de toda la copa del árbol. Además se obtuvo la ubicación de cada árbol por bosque con ayuda de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

Garmin eTrex y, con una cinta diamétrica, se tomó el diámetro a la altura del pecho (DAP, 1.30 m) durante otoño de 2011, 2012 Y 2013. Se estimó el incremento de DAP como la diferencia entre los años 2013 y 2011. Se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 30 cm en los tres bosques en el año 2013 en los meses de abril, junio y septiembre para determinar el pH con un medidor marca Hanna pH 210. Asimismo, se colectó una muestra foliar del dosel de los árboles antes de la caída de hojas en el otoño con la cual se obtuvo el área foliar para 100 hojas por árbol, con la ayuda un medidor de área foliar marca Li-cor modelo Li-3100C. Posteriormente las muestras se secaron en horno a 70°C hasta que tuvieron un peso constante y se pesaron para obtener el área foliar específica (AFE) de las 100 hojas a través de la siguiente fórmula:

$$AFE = \frac{AF}{W}$$

Dónde:

AFE= Área foliar específica de 100 hojas (cm²/g)

AF= Área foliar medida para 100 hojas (cm²)

W= peso seco de las 100 hojas (g)

Tanto el área foliar, área foliar específica y peso seco de hojas se obtuvieron a partir de una colecta antes del otoño, y éstas se correlacionaron con los metales y los macronutrientes.

Para la obtención de las concentraciones de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd, se colectó una muestra por árbol en la primavera y el en el verano, la cual fue subdivida en dos submuestras. De la primera, se pesaron 20 g de follaje húmedo por árbol y éste fue sometido a un lavado con una solución a base de EDTA disódico a una relación molar Pb/EDTA=0.12, tal y como lo hizo Olguín *et al.* (2005), con la finalidad de cuantificar la cantidad de metales en la superficie de las hoja. Dado que el EDTA es una sustancia que tiene la capacidad de adsorber metales presentes en una solución o material, permite la cuantificación de los mismos. La segunda submuestra permaneció sin ningún tratamiento para cuantificar la concentración total de metales.

Posteriormente, ambas muestras se secaron en horno hasta que alcanzaron peso constante a una temperatura de 70°C y después se trituraron en un molino marca GI y se tamizaron con una malla de 2 mm. Se pesaron 0.25 g de la muestra molida y se sometieron a un proceso de digestión con 6 mL de HNO₃ en un digester tipo micro ondas. Las submuestras fueron aforadas a 25 mL y filtradas con papel whatman sin cenizas del número 45.

En los muestreos de otoño e invierno se colectó una única muestra a la que se le aplicó un primer lavado con una solución de EDTA, de la misma forma que a las muestras de la primavera y el verano. Se realizó un segundo lavado con agua deionizada. Y las soluciones resultantes de los lavados se analizaron químicamente mientras que el follaje triturado fue digerido para su análisis.

La lectura de todas las muestras se realizó con un equipo ICP (Inductively Coupled Plasma) modelo 3000, con el cual se determinó la concentración de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd.

Para conocer las concentraciones superficiales de los elementos bajo estudio, que se depositan sobre las hojas, se realizaron dos tipos de manejo:

- 1) Una submuestra de hojas se lavó con EDTA y se digirió. Al lavar así, se desorbieron los metales superficiales y sólo se determinó la concentración intracelular del metal.
- 2) La Otra sub-muestra de hojas, se lavó con EDTA y la determinación se realizó al agua de lavado. En este caso, se determinaron directamente los elementos adheridos a la superficie.

$$C_t = C_i + C_s$$

Dónde:

C_t= Concentración total de elementos (superficiales e intracelulares)

C_i= Concentración intracelular (concentración en hojas lavadas con EDTA y digeridas)

Cs= Concentración superficial obtenida por determinación directa al agua de lavado con EDTA

Para determinar P y K se realizaron los mismos procedimientos que en los metales y la lectura se llevó a cabo con un equipo ICP. Para la determinación del nitrógeno se utilizó la metodología de Kjeldahl.

Además, se consiguieron datos de precipitación, por época estacional (2011 y 2012), de las estaciones meteorológicas automáticas de la Comisión Nacional del agua (CONAGUA) más cercanas a los bosques (Presa madin, tezontle y ecoguardas) y de partículas de PM₁₀ y Pb suspendidas en el aire que reporta el sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT) de las estaciones FES Acatlán (FAC), Merced (MER) y Pedregal (PED) para dilucidar si existe alguna relación de estas partículas con respecto a las concentraciones encontradas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co y Cd.

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete MINITAB® versión 14. Se obtuvieron modelos de regresión múltiple para conocer si existe algún efecto sobre el área foliar, área foliar específica y el peso seco de las 100 hojas así como el incremento del DAP ocasionado por las concentraciones foliares intracelulares y superficiales de los elementos Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Co, Cd, N, P, K y el pH del suelo. Lo anterior se logró a través del método *Stepwise* con *forward selection* y *backward elimination*, procurando seleccionar aquellos modelos que asemejaban un mejor comportamiento con los datos reales. Además se realizó una prueba de *Kruskal Wallis* a nivel bosque y posteriormente una prueba de U de *Mann-Whitney*; la primera prueba fue para conocer si existen diferencias significativas entre parques y la segunda para conocer que bosque era diferente según las variables área foliar, área foliar específica, peso seco e incremento en diámetro, considerando un valor de confiabilidad de $\alpha=0.05$. Finalmente se llevó a cabo un análisis nutrimental a través de nomogramas de vectores (Timmer y Stone 1978) para diagnóstico nutrimental siguiendo la metodología de López-López y Alvarado-López, (2010).

2.5 Resultados y discusión

Las concentraciones promedio superficiales e intracelulares de cobre (Cu), zinc (Zn), plomo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr) y cadmio (Cd) en el follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Encontradas en el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan, por época del año se reportan en la Cuadro 2.1.

Para cobre y zinc en general se observó que las concentraciones promedio superficiales están dentro de los rangos normales para el género *Fraxinus* de acuerdo a lo reportado por Mills y Jones (1996) las cuales son de 7-20 mg Kg⁻¹ cobre y hasta 34 mg Kg⁻¹ para zinc y son más altas según lo que reporta Gutiérrez (2013) para *Fraxinus uhdei* exceptuando el Cu la primavera (44. 42 mg Kg⁻¹) para el bosque urbano los Colomos.

Plomo, níquel, cromo y cadmio presentaron concentraciones promedio superficiales e intracelulares bajas con respecto a las reportadas por Aksoy y Demerizen (2006) para un parque urbano sobre la especie *Fraxinus excelsior* (12.39 mg Kg⁻¹, 20.01 mg Kg⁻¹, 1.70 mg Kg⁻¹, y 0.36 mg Kg⁻¹ respectivamente); así mismo también son menores solo para Pb comparadas con las reportadas por Gutiérrez (2013) para *Fraxinus uhdei* (9.34 mg Kg⁻¹ en hojas sin lavar y 8.6 mg Kg⁻¹ en lavadas). Sin embargo las concentraciones halladas en este estudio no llegan a exceder los niveles críticos tóxicos para plantas según Kabata- Pendias (2011), excepto níquel, dichas concentraciones son de 0.5-3 mg Kg⁻¹ para Pb, 0.5-5 mg Kg⁻¹ en Ni, 5-30 mg Kg⁻¹ Cr y 3-5 mg Kg⁻¹ Cd.

Cuadro 2-1. Concentraciones promedio de las partículas de Cu, Zn, Pb, Ni, Cr y Cd depositadas sobre hojas de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) en las cuatro estaciones del año para el Parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.

Bosque	Metal (mg kg ⁻¹)	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
		Superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular
Naucalli	Cu	14.29 ± 6.09	13.64 ± 5.85	17.90 ± 7.78	16.75 ± 7.31	7.06±3.58	0.004±0.001	5.49±2.00	0.01±0.01
	Zn	27.14 ± 9.42	20.92 ± 6.11	36.0 ±14.76	23.60 ± 8.14	8.98±2.35	0.01±0.01	10.30±2.79	0.02±0.01
	Pb	0.24 ± 0.16	N/d	2.23 ± 2.25	0.04 ± 0.01	0.05±0.01	0.001±0.001	1.98±2.47	0.01±0.001
	Ni	N/d	N/d	16.36±11.83	2.35 ± 0.58	0.01±0.01	0.002±0.001	0.002±0.001	0.01±0.001
	Cr	0.52 ± 0.23	0.21 ± 0.17	1.66 ± 1.21	0.84 ± 0.57	0.001±0.001	0.001±0.00	0.28±0.61	0.01±0.001
	Cd	0.11 ± 0.04	0.06 ± 0.26	0.05 ± 0.05	0.02 ± 0.02	0.006±0.002	0.001±0.001	0.07±0.02	0.001±0.001
Chapultepec	Cu	11.37±6.52	8.32±6.01	10.63±5.07	5.96±1.91	5.52±3.03	0.01±0.01	6.79±3.26	0.02±0.02
	Zn	22.09±10.06	16.82±8.63	21.50±7.83	14.54±2.56	11.85±3.30	0.02±0.01	11.66±4.49	0.04±0.03
	Pb	0.58±0.53	N/d	0.26±0.27	N/d	0.01±0.01	0.01±0.01	4.69±4.34	0.01±0.01
	Ni	11.95±1.63	N/d	11.79±10.16	N/d	0.01±0.01	0.001±0.001	0.01±0.01	0.01±0.001
	Cr	1.17±1.07	0.19±0.19	0.53±0.27	0.34±0.02	0.01±0.01	0.01±0.001	0.98±0.66	0.001±0.001
	Cd	0.15±0.08	0.05±0.02	0.21±0.03	0.12±0.13	0.01±0.01	0.001±0.001	1.10±0.20	0.01±0.01

Bosque	Metal (mg kg ⁻¹)	Primavera		Verano		Otoño		Invierno	
		Concentración							
		Superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular	superficial	intracelular
Tlalpan	Cu	7.59±3.79	7.59±3.79	11.82±6.76	7.75±3.97	4.17±1.05	0.02±0.01	4.77±1.96	0.01±0.001
	Zn	25.07±7.44	25.07±7.44	29.10±6.74	19.35±5.30	10.19±2.66	0.01±0.01	9.74±4.10	0.02±0.01
	Pb	N/d	N/d±	0.42±0.42	0.10±0.01	0.001±0.01	0.001±0.001	1.81±2.68	0.01±0.001
	Ni	0.45±0.01	0.45±0.02	7.13±3.65	N/d±	0.01±0.01	0.01±0.001	0.001±0.01	0.001±0.001
	Cr	0.32±0.01	N/d±	0.57±0.52	N/d±	0.001±0.001	0.001±0.001	0.07±0.10	0.01±0.001
	Cd	0.06±0.03	0.06±0.03	0.14±0.05	0.09±0.04	2.18±0.50	0.01±0.01	0.18±0.01	0.01±0.001

Notas: N/d= no determinado. ± es la desviación estándar.

Para la interpretación de los resultados obtenidos en este estudio, sobre los modelos de regresión múltiple (Cuadros 2.2- 2.6) se asume que hay una relación causa-efecto entre las variables del árbol: Área foliar (AF), área foliar específica (AFE) y el peso seco de 100 hojas (PS), así como el incremento de diámetro (ΔD) con respecto a las concentraciones superficiales e intracelulares de los elementos: Fósforo, potasio, cobre, zinc, plomo, níquel, cromo y cadmio; así como el pH del suelo y Nitrógeno (N) total. Aunque esta suposición no es del todo válida puesto que hay diversas variables que pueden influir y no fueron consideradas para los fines de este estudio. No obstante, los resultados de este trabajo pueden ser una base de partida importante para trabajos posteriores.

Se encontró que el AF, AFE, PS y ΔD , se relacionan de manera más consistente con las concentraciones superficiales e intracelulares de los elementos potasio, cobre, zinc y cadmio; y en dos casos con el pH del suelo de otoño para el bosque de Tlalpan.

En el área foliar, la cual define la capacidad de la cubierta vegetal para realizar el proceso fotosintético, se encontró que el Cu y Zn se representaron de manera más constante en algunos modelos (Cuadro 2.2). De los modelos obtenidos para el AF llama la atención el primer caso en donde se obtuvo que para el parque Naucalli en el invierno, asumiendo valores constantes de Cu_{sup} , en promedio el AF disminuye 118 cm^2 por unidad de Cu_{sup} . De la misma forma, asumiendo valores constantes de Zn_{sup} , en promedio el AF aumenta en 144 cm^2 por cada unidad de Zn_{sup} , mientras que bajo un valor constante de Cu_{intra} en promedio el área foliar aumentaría 28.66 cm^2 , mientras que la constante 994 es un factor de ajuste. La contradicción de Cu_{sup} y Cu_{intra} , quizás se deba a que la concentración en el ambiente de partículas suspendidas en el aire PM_{10} (entre las que se encuentra el Cu) en el invierno es en promedio de 40 $\mu g/m^3$ (Figura 2.2) ligeramente elevada, sin rebasar lo recomendado por la NOM-025-SSA1-1993 (50 $\mu g/m^3$). El Cu puede estar depositándose sobre el follaje de *Fraxinus*, generando problemas de permeabilidad e interviniendo en procesos fotosintéticos (Reilly y Reilly, 1973 y Uzma *et al.*, 2013) sin embargo, si penetra en la hoja no estará en forma asimilable mientras no se asocie con aminoácidos o péptidos (Reilly *et al.*,

1970). Por lo que en los modelos donde aparece el Cu_{sup} como un elemento con efectos negativos indican que en forma superficial en las hojas, éste tiene efectos negativos, contrariamente a lo que sucede cuando se encuentra el elemento en el interior del tejido foliar. Esto puede implicar que internamente se trata de un nutrimento que se encuentra no asimilable.

Por otro lado también se encontró que el plomo depositado superficialmente sobre el follaje, para el bosque de Chapultepec en el otoño y el invierno cuando las concentraciones promedio de las partículas suspendidas en el aire son altas de acuerdo a la NOM-025-SSA1-1993 en promedio de 48 y 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (Figura 2.2), tiene un efecto negativo sobre el área foliar, por lo que en el caso del modelo otoño, este indica que asumiendo valores constantes de Pb_{sup} en promedio el AF disminuye 120.13 cm^2 por cada unidad de Pb_{sup} que se aumente, mientras que en el invierno disminuye 85.7 cm^2 . Lo anterior tiene sentido ya que este elemento es tóxico para la plantas y aun cuando no está muy definido el grado de toxicidad que presenta en ellas, se sabe que es inhibidor del proceso de respiración y fotosíntesis principalmente (Kabata-Pendias, 2011). Los coeficientes obtenidos son muy altos, lo que indica que dichas concentraciones son sumamente bajas (tabla 2.1) y no están siendo tóxicas para los árboles; es decir, no exceden los 3-5 mg Kg^{-1} en promedio que reporta Kabata-Pendias (2011) como tóxicos en la vegetación

Para los modelos de área foliar a nivel época estacional, los principales cambios se observan en el otoño y en el invierno (Cuadro 2.1), justo cuando las concentraciones de partículas suspendidas en el aire fueron altas (Figura 2.2) y en la temporada en la que las hojas caen y las plantas dejan de crecer y como bien se sabe, el área foliar es un parámetro característico por especie (Nouvellon *et al.*, 2010) que cambia según la edad de los individuos y la época del año (Delzon *et al.*, 2005).

Cuadro 2-2. Cambios encontrados para el área foliar de 100 hojas por bosque y época estacional.

Bosque	Época estacional	Modelo	Valor-p	R ² (%)
Naucalli	Invierno	$AF = 994 - 118 Cu_{sup} + 144 Zn_{sup} + 28.66 Cu_{intra}$	0.021	45
Chapultepec	Otoño	$AF = 8.52 - 23.98 Ni_{sup} - 2.16 N - 99.2 Cu_{sup} - 120.13 Pb_{sup}$	0.001	62
	Invierno	$AF = 939 + 1.257 Co_{sup} - 85.7 Pb_{sup}$	0.003	59
Tlalpan	Otoño	$AF = 5.240 - 673.6 Cd_{intra} - 151 Zn_{sup} + 678 pH_{septiembre}$	0.002	66

AF= área foliar; Cu_{sup}= Cobre superficial; Cu_{intra}= cobre intracelular; Zn_{sup}= Zinc superficial; Zn_{intra}= Zinc intracelular; Cd_{intra}= cadmio intracelular; pH= pH del suelo tomado según mes; N= nitrógeno; Pb_{sup}= plomo superficial; Ni_{sup}= níquel superficial; Co_{sup}= cobalto superficial.

El área foliar específica es definida como la razón entre la área foliar y peso de la hoja y además de eso un indicador del índice de espesor y densidad de la hoja (Hunt, 1990). Las principales causas-efecto de las partículas sobre esta variable se observan en el Cuadro 2.3. Se encontró que P, K, Zn y el pH del suelo son los principales elementos que generaron algún cambio sobre el área foliar. De los modelos obtenidos el del parque Naucalli en el invierno, destacan los efectos del P_{sup} y el P_{intra}. En estos casos se observa que la concentración de fósforo tiene un efecto negativo sobre el área foliar específica, lo que indica que asumiendo valores constantes de P_{sup}, en promedio el AFE disminuye 16.2 cm² por unidad de P_{sup}. De la misma forma, asumiendo valores constantes de P_{intra}, en promedio el AFE disminuye en 280 cm² por cada unidad de P_{intra}. La constante 135 es un factor de ajuste. En este caso las concentraciones promedio obtenidas para esta época son de 5.3 % P_{sup} y 0.3 % P_{intra}, por arriba de lo reportado como estándar por Mills y Jones (1996) para *Fraxinus* 0.16-0.48% lo que ocasiona estos efectos negativos sobre el AFE.

Potasio también ocasionó cambios en el área foliar específica para el bosque de Tlalpan. En la primavera el modelo indica que asumiendo valores constantes de K_{sup} , en promedio el AFE aumenta 46.2 cm^2 por unidad de K_{sup} . De la misma forma en el otoño, asumiendo valores constantes de K_{intra} , en promedio el AFE aumenta 17.8 cm^2 por unidad de K_{intra} . Las concentraciones promedio obtenidas para estos periodos son de 3.6 y 3.2 % respectivamente y son bajas con respecto a las reportadas como estándar para el género *Fraxinus* 0.80-2.01 % lo que indica que este elemento es deficiente en el área por lo que considerando el hecho de que sólo entre 0.1 a 2 % del potasio que se encuentra en suelo es aprovechable para las plantas en forma lenta (Mills y Jones, 1996) se puede ver que al elevarse las concentraciones de K se da un aumento del área foliar específica. Del potasio se sabe que participa en el sostenimiento del potencial osmótico de las plantas con lo cual se mantienen turgentes (Marschner, 2012).

Para el nitrógeno total que mostró efectos negativos (Cuadro 2.3) en bosque de Tlalpan en la primavera en donde el AFE disminuye en promedio 32.6 cm^2 por cada unidad de N, el efecto se deba quizás a que la zona estudiada, se reporta una saturación de este elemento como producto de la lluvia ácida, (Fenn *et al.*, 1999; Fenn *et al.*, 2002).

Cuadro 2-3. Relaciones entre el área foliar específica de 100 hojas por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.

Bosque	Época estacional	Modelo	Valor-p	R ² (%)
Naucalli	Invierno	$AFE = 135 - 16.2 P_{Sup} - 280 P_{intra}$	0.002	62
Tlalpan	Primavera	$AFE = 77.5 + 46.2 K_{Sup} - 32.6 N - 0.646 Zn_{Sup}$	0.003	63
	Otoño	$AFE = 32.3 + 27.6 pH_{septiembre} - 3.60 Zn_{Sup} + 17.8 K_{intra}$	0.007	55

AFE= área foliar específica; Cr_{intra}= cromo intracelular; N= nitrógeno; Cr_{sup}= cromo superficial; P_{sup}= fósforo superficial; P_{intra}= fósforo intracelular; K_{sup}= potasio superficial; K_{intra}= potasio intracelular; pH del suelo tomado según mes; Zn_{sup}= Zinc superficial; Ni_{sup}= níquel superficial.

Para el peso seco de 100 hojas (Cuadro 2.4), se observó que el Cd intracelular tuvo un efecto negativo para el parque Naucalli; en el invierno y en el otoño en el bosque de Tlalpan justo en épocas donde escasea la precipitación en la ZMVM y ocurren inversiones térmicas (Jáuregui, 1989). Este elemento puede llegar a ser tóxico para la vegetación en concentraciones de 3-5 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2011) y se ha reportado que cuando se encuentra depositado en el suelo en concentraciones altas este tiende a ser absorbido por las plantas y a acumularse en el follaje (Migeon *et al.*, 2009). De este elemento se sabe que cuando está presente en áreas urbanas, es proveniente del tráfico vehicular (Nazzal *et al.*, 2014). Las concentraciones halladas en este estudio indican que asumiendo valores constantes de Cd para el Parque Naucalli en la primavera el PS en promedio disminuiría en 38.62 g, mientras que en Tlalpan en el otoño sería de 80.24 g.

Cuadro 2-4. Relaciones entre peso seco de 100 hojas por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.

Bosque	Época estacional	Modelo	Valor-p	R ² (%)
Naucalli	Invierno	$PS = 11.9 + 4.81 Zn_{Sup} - 38.62 Cd_{intra} + 922 Ni_{Sup} + 5.81 K_{Sup}$	0.002	71
Chapultepec	Primavera	$PS = 10.6 + 1.27 Zn_{Sup} - 3.89 Cr_{Sup} - 1.12 Cu_{intra}$	0.020	62
	Invierno	$PS = 49.5 - 12.7 K_{intra} - 1.03 Cu_{Sup} - 1.41 Pb_{Sup}$	0.002	64
Tlalpan	Otoño	$PS = 91.1 - 80.24 Cd_{intra} - 6.68 K_{intra}$	0.006	50

PS= peso seco de 100 hojas; Zn_{sup}= Zinc superficial; Cd_{intra}= cadmio intracelular; Ni_{sup}= níquel superficial; Zn_{sup}= Zinc superficial; Cu_{intra}= cobre intracelular; K_{intra}= potasio intracelular; Cu_{sup}= Cobre superficial; Pb_{sup}= plomo superficial.

Los principales efectos sobre el incremento en diámetro se encontraron en la primavera para el parque Naucalli, invierno para Chapultepec y otoño en el bosque de Tlalpan (Cuadro 2.5). Los elementos que generaron algún cambio sobre el incremento en diámetro fueron K, Cr, Ni, Cd y Zn.

Potasio se considera un nutrimento esencial para el desarrollo y crecimiento de las plantas, sin embargo en concentraciones altas (salinas) puede llegar a ser tóxico (Marschner's, 2012), quizá en ciertas épocas del año como se observó para el bosque de Chapultepec en el invierno (5 %), existan cambios en el suelo que esté siendo absorbido por la raíz, ocasionando cierto grado de toxicidad a los árboles de *Fraxinus*.

Por otro lado el Cd *intra* para el bosque de Chapultepec en el invierno mostró que el ΔD considerando valores constantes de Cd se ve afectado en menos 0.66 cm por cada unidad de Cd *intra* que se aumente. De este elemento se sabe que en las plantas ocasiona disminución de la tasa de transpiración y la fotosíntesis así como limitación en el crecimiento de las plantas (Vassilev y Yordanov, 1997, Kos *et al.*, 2003).

Cuadro 2-5. Relaciones entre incremento en diámetro, por bosque y época, y metales estudiados superficial e intracelularmente.

Bosque	Época estacional	Modelo	Valor-p	R ² (%)
Naucalli	Primavera	$\Delta D = 1.80 - 2.59 Cr_{intra}$	0.000	65.5
Chapultepec	Invierno	$\Delta D = 8.13 - 0.20 K_{intra} - 18.2 Ni_{intra} - 0.66 Cd_{sup} - 2.50 Zn_{intra}$	0.001	73.8
Tlalpan	Otoño	$\Delta D = 0.69 + 1.03 K_{sup} + 0.89 K_{intra}$	0.050	28.8

ΔD = incremento en diámetro; Cr *intra*= cromo intracelular; pH del suelo tomado según mes; Cd *intra*= cadmio intracelular; K *intra*= potasio intracelular; Cd *sup*= cadmio superficial; K *sup*= potasio superficial; P *intra*= fósforo intracelular; P *sup*= fósforo superficial; Zn *intra*= Zinc intracelular.

Se encontraron diferencias significativas por Bosque en AFE y ΔD , mientras que para las variables AF y PS no se encontraron variaciones, lo anterior de acuerdo al estadístico *Kruskall wallis* (Cuadro 2.6).

El Bosque de Tlalpan mostró los valores de mediana más altos para el área foliar específica (AFE), sin embargo al realizar el estadístico de *U de Mann Whitney* se encontró que el parque Naucalli es diferente a Chapultepec y Tlalpan. Naucalli presentó un área foliar específica menor, hallazgo que quizá esté influenciado por las variaciones a las que responde el área foliar específica, que a su vez está afectada por el ambiente, cambios en el crecimiento, desarrollo (de la Vega *et al.*, 2010) y edad de los individuos (Delzon *et al.*, 2005). El bosque de Tlalpan, por su condición de Área Natural Protegida (ANP), ofrece a la vegetación mejor calidad de vida y es quizás el factor que esté influyendo para un mayor desarrollo de área foliar. En cambio en el Bosque de Chapultepec quizás una mayor AFE se deba a la edad de los árboles los cuales en general se pudo apreciar son más viejos que los árboles en el parque Naucalli los cuales además se encuentran en competencia con otras especies del parque. De *Fraxinus* se sabe que por naturaleza presenta tronco recto con ramas ascendentes y hojas compuestas por folíolos con alta demanda de luz (Vázquez *et al.*, 1999), lo cual sugiere que quizás en el parque Naucalli la edad de los árboles y la competencia que existe con otras especies, este ocasionando un menor desarrollo de AFE.

Por otro lado, para el incremento del diámetro, tomado a la altura del pecho también se observaron diferencias significativas entre bosques, de acuerdo a los resultados obtenidos posteriormente con la prueba *U de Mann Whitney*. El parque Naucalli en promedio tuvo los incrementos más altos (Cuadro 2.5). Este hecho quizá se debe a que en general árboles más jóvenes tienen la capacidad de absorber más eficientemente los nutrientes esenciales para su desarrollo (Mills y Jones 1996, Kabata-pendias 2011, Marschner's, 2012) y por lo tanto crecen más rápido; el parque Naucalli es el que tiene la vegetación más joven, además sus valores promedios de pH (5.57) comparados con los de Chapultepec (6.03) y Tlalpan (5.14) son más cercanos a los valores

recomendados por Kamprath (1967) y Pearson (1975) como neutros y que permite un buen desarrollo de raíces, por lo que la combinación de esos factores quizás estén favoreciendo el crecimiento de los árboles.

Cuadro 2-6. Comparación estadística (prueba de Kruskal Wallis) para las variables área foliar (AF), área foliar específica (AFE) y peso seco de 100 hojas (PS) e incremento en diámetro (ΔD) de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) para el parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.

Variable	Naucalli	Chapultepec	Tlalpan	Valor
	M_e	M_e	M_e	p
AF (cm ²)	2,065	2,595	2,539	0.140
AFE (cm ²)	56.1 a	66.6a	78.7b	0.001
PS (g)	34.90	33.67	29.19	0.105
ΔD (cm)	1.20a	0.50b	0.50b	0.002

Nota: Para una variable, letras iguales significan que no existen diferencias significativas entre los bosques de acuerdo con la prueba *U de Mann Whitney*. M_e = mediana

Gráficamente se observó que de acuerdo a lo reportado por las estaciones meteorológicas del SIMAT para partículas suspendidas en el aire PM₁₀ en el otoño y el invierno las concentraciones promedio son más altas con respecto a primavera y verano a excepción del bosque de Chapultepec el cual muestra sus valores promedios más altos en la primavera 56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y el invierno 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ valores que exceden lo recomendado por la NOM-025-SSA1-1993.

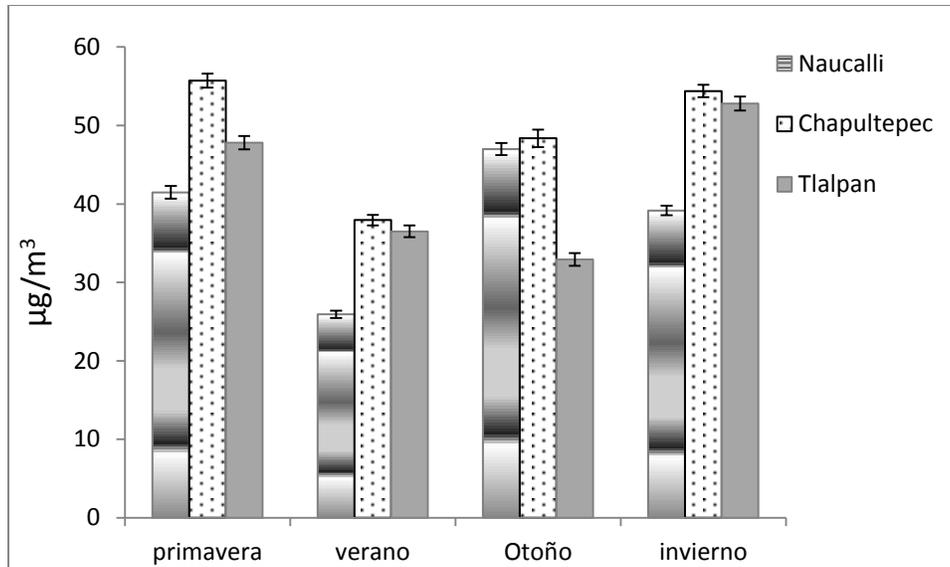


Figura 2.2 .Concentraciones de Partículas suspendidas en el aire de tamaño PM₁₀ obtenidas de las estaciones meteorológicas del sistema de monitoreo atmosférico de la Ciudad de México cercanas al Parque Naucalli y los bosques Chapultepec y Tlalpan.

El estado nutrimental de los 45 árboles seleccionados de *Fraxinus uhdei* (Wenz.), a través de los nomogramas de análisis de vectores de Timmer *et al.*, 1978 (Figuras 2.3 a,b,c) señala que en el parque Naucalli se registraron las mayores concentraciones de nitrógeno y fósforo así como los mayores pesos secos, lo que indica una relación de que a mayor peso seco, mayor concentración y contenido de N y P. No obstante, elevadas concentraciones de un nutrimento, de acuerdo con López-López y Alvarado-López (2010) pueden ser indicativas de exceso del nutrimento, lo cual está de acuerdo con los efectos negativos del P, encontrados en este parque. El parque Naucalli tiene árboles más jóvenes, con respecto a los otros dos bosques, y se sabe que árboles jóvenes tienen la capacidad de absorber y transportar más eficientemente los nutrientes que requieren (Marschner's, 2012). En el bosque de Tlalpan se obtuvieron las concentraciones más altas de K.

El bosque de Chapultepec mostró las concentraciones más bajas de nitrógeno, fósforo y potasio sin llegar a ser deficientes (Figura 2.3a) Mills y Jones (1996) reportan que las concentraciones de éste elemento para fresno van de 0.78 a 2.86 %.

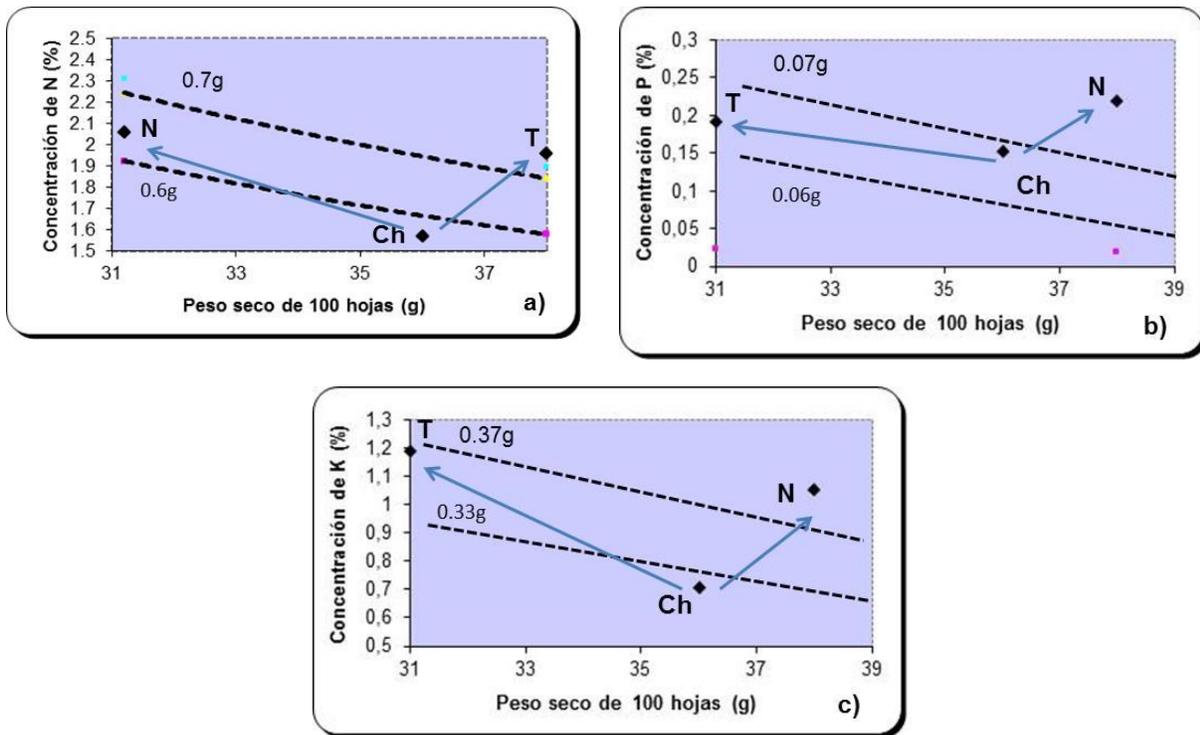


Figura 2.3. Nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio del peso seco de 100 hojas en el parque Naucalli (N) y los bosques Chapultepec (Ch) y Tlalpan (T).

2.6 Conclusiones

Se observaron cambios en el área foliar, área foliar específica, peso seco de hojas y el incremento en diámetro principalmente en la primavera y el invierno, justo cuando los periodos de crecimiento de las plantas se ven afectados y en el invierno los niveles de contaminación en general aumentan por efecto de la inversión térmica.

El área foliar, área foliar específica, peso seco de hojas y el incremento en diámetro se ven afectados de manera más consistente por las concentraciones superficiales e intracelulares de algunos elementos como K, Cu y Zn.

Se encontró que existen diferencias en el área foliar específica y el incremento en diámetro entre bosques, detectándose que en el parque Naucalli los incrementos de diámetro son mayores, mientras que el área foliar específica más alta en promedio la tiene el bosque de Tlalpan.

Los mayores contenidos de P y K se encontraron en el bosque de Naucalli, mientras que el bosque de Tlalpan presentó los mayores contenidos de N.

2.7 Literatura citada

- Aksoy A. y Demirezen D. 2006. *Fraxinus excelsior* as a Biomonitor of Heavy Metal Pollution. Pol. J. Environ. Stud. 15, 27-33.
- Alvarado-Rosales D. y Hernández-Tejeda T. 2002. Decline of sacred fir in the Desierto de los Leones National Park. In: Fenn M.E., de Bauer L.I., Hernández-Tejeda T. (Eds.), Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp. 243-260.
- Benavides M. H.M., López M. R. y Flores H. J. (2002). Daños a banquetas por arbolado de alineación establecido en cepas en la delegación Coyoacán, Distrito Federal. Rev. Cien. For. en Mex. 27, 53-77.
- Bravo-Álvarez H., Torres-Jardón R. 2002. Air pollution levels and trends in the Mexico City Metropolitan Area. In: Fenn M.E., de Bauer L.I., Hernández-Tejeda T. (Eds.), Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp. 121-159.
- Campos A., Alcaraz G.I., Herrera E.F., Sosa M., Jiménez J., Delgado M., Ramírez E. y Puga S. 2007. Análisis temporal de las concentraciones, distribución de tamaño y morfología de partículas suspendidas menores a 10 micras en la ciudad de Chihuahua, México. Revista Latinoamericana de Recursos Naturales 3, 44-51.
- de la Vega M., Pinazo M. y Barth S. 2010. Variación del área foliar específica en *Pinus elliottii* var. *elliottii* Engelm X *Pinus caribaea* var *hondurensis* Morelet.—Y su extrapolación al cálculo del área foliar proyectada. Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. 14, 1-8
- Delzon S., Bosc A., Cantet L. y Loustau D. 2005. Variation of the photosynthetic capacity across a chronosequence of maritime pine correlates with needle phosphorus concentration. Annals of Forest Science. 62, 537-543.
- Escobedo F. y Chacalo, A. 2008. Estimación Preliminar de la descontaminación atmosférica por el arbolado urbano de la ciudad de México. Interciencia 33, 29-33.

- Farooq M., Arya K. R., Kumar S., Gopal K., Joshi P. C., y Hans R. K. 2000. Industrial pollutants mediated damage to mango (*Mangifera Indica*) crop: A case study. *J. Environ. Biol.* 21, 165–167.
- Fenn M. E., Bauer L.I., Quevedo-Nolasco A., Rodríguez-Frausto C. (1999) Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the valley of Mexico. *Water Air Soil Poll.* 113, 155-174.
- Fenn M. E., Bauer L.I., Rodríguez C., Hernández-Tejeda T. (2002). Nitrogen and Sulphur deposition in the Mexico City Air Basin: impacts of Forest nutrient status and nitrate levels in drainage waters. In: Fenn, M.E., de Bauer, L.I., Hernández-Tejeda, T. (Eds.), *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies Series, vol. 156. Springer-Verlag, New York, pp. 298-319.
- Gutiérrez Martínez, P. B. 2013. Acumulación de contaminantes en especies vegetales en la Zona Metropolitana de Guadalajara (Tesis de Licenciatura). Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Accedido el 14 de diciembre, 2014, desde:
http://biblioteca.cucba.udg.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5561/Gutierrez_Martinez_Paulina_Beatriz.pdf?sequence=1
- Hunt R. 1990. *Basic growth analysis: Plant growth analysis for beginners*. London England: Unwin Hyman. (p. 30)
- Jáuregui, E. 1989. The dust storms of Mexico City. *Int. J. Climatol.* 9, 169-180.
- Kabata-Pendias A. 2011. *Trace elements in soils and plants*. 4rd ed. CRC Press. Boca Raton, FL.(USA). 505 pp.
- Kamprath E. 1967. Acidez del suelo y su respuesta al encalado. *International Soil Testing. Bol. Téc. No. 4* Raleigh, North Carolina. 24p.
- Kos B. Grčman H. y Leštan D. 2003. Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. *Plant soil environ.* 49, 548–553

Litschke T. y Kuttler W. 2008 On the reduction of urban particle concentration by vegetation – a review. *Meteorologische Zeitschrift*, 17, 229-240.

López-López M.A y Alvarado-López J. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y Bosques* 16, 99-108.

Migeon A., Richaud P., Guinet F., Chalot M. y Blaudez D. 2009. Metal accumulation by woody species on contaminated sites in the north of France. *Water Air Soil Poll.* 204, 89-101.

Mills H.A. y Jones J.B. Jr. 1996. *Plant Analysis Handbook 11*. Micro-Macro Publishing, Athens, GA 500p.

Nazzal Y., Ghrefatl H. y Rosen M.A. 2014. Heavy Metal Contamination of Roadside Dust: a Case Study for Selected Highways of the Greater Toronto Área, Canada Involving Multivariate Geostatistic. *Res. J. of Environ. Sci.* 8, 259-273.

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, partículas de 10 micras (PM10). Valor permisible para la concentración de partículas menores de 10 micras en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. (Diario Oficial de la Federación), lunes 26 de septiembre de 2005. Accedido el 21 de diciembre de 2014 desde: <http://www.aire.df.gob.mx/descargas/monitoreo/normatividad/NOM-025-SSA1-1993.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993. Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire, plomo (pb). Valor permisible para la concentración de plomo en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. . (Diario Oficial de la Federación), lunes 26 de septiembre de 2005. Accedido el 21 de diciembre de 2014 desde:
<https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cofepris.gob.mx%2FMJ%2FDocuments%2FNormas%2F026ssa1.pdf&ei=vyvKVJ3VEtH4yQT-pYKgCA&usg=AFQjCNFTHf4z8CbnZjhaXzi3IYh-yLKsPQ&bvm=bv.84607526,d.aWw>

- Nouvellon Y., Laclau J.P., Epron D., Kinana A., Mabiata A., Roupsard O., Bonnefond J.M., le Maire G., Marsden C., Bontemps J.D. y Saint-André L. 2010. Within-stand and seasonal variations of specific leaf area in a clonal *Eucalyptus* plantation in the Republic of Congo. *Forest. Ecol. Manag.* 259, 1796-1807.
- Olguín E.J., Sánchez-Galván G., Pérez-Pérez T. y Pérez-Orozco A. 2005. Surface adsorption, intracellular accumulation and compartmentalization of Pb (II) in batch operated lagoons with *Salvinia minima* as affected by environmental conditions, EDTA and nutrients. *J Ind Microbiol Biotechnol.* 32, 577–586.
- Pearson R.W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. *Cornell Inter. Agric. Bul.* No. 30. Ithaca, Cornell. 66p.
- Pourkhabbaz A., Rastin N., Olbrich A., Langenfeld-Heyser R. y Polle A. 2010. Influence of environmental pollution on leaf properties of Urban Plane Trees, *Platanus orientalis* L. *Bull Environ Contam Toxicol.* 85, 251-255.
- Prajapati S. K., y Tripathi B. D. 2008. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *J Environ Qual.* 37, 865-870.
- Reilly A. y Reilly C. 1973. Copper-induced chlorosis in *Becium homblei* (De Wild.) Duvign Plancke. *Plant and Soil* 38, 671-674.
- Rubio M. A., Lissie E., Riveros V. y Páez M. A. 2001. Remoción de contaminantes por lluvias y rocios en la región Metropolitana. *Boletín de la Sociedad Chilena de Química*, 46(3), 353-361. Accedido el 10 de enero de 2015, desde: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-16442001000300014&lng=es&tlng=es. 10.4067/S0366-16442001000300014.
- Samal A.K. y Santra S. C. 2002. *Ind. J. Environ. Health* 44, 71–76.
- Sharifi M. R., Gibson A. C., y Rundel P.W. 1997. Surface dust impacts on gas exchange in Mojave Desert shrubs. *J. Appl. Ecol.* 34, 837–846.

- Seyyednejad S. M., Niknejad M., y Koochak H. 2011. A review of some different effects of air pollution on plants. *Res. J. Environ. Sci.* 5, 302-309.
- Shkolnik M. J. 1974. *Microelements in Plant Life*, Izd. Nauka, Leningrad, 323p.
- Sukumaran D. 2012. Effect of particulate pollution on various tissue systems of tropical plants. Central Pollution Control Board (CPCB), Zonal Office, Kolkata, India.
- Timmer, V, R. y E. L. Stone. 1978. Comparative foliar analysis and visual symptoms. Pp. 113-134. *In*. R. Van den Driessche (Ed.). *Mineral nutrition of conifer seedlings*. CRC Press. Boca Raton FL, EEUU.
- Uzma Younis., Tasveer Zahra Bokhari., Saeed Ahmad Malik., Shakil Ahmad y Ramiz Raja. 2013. Variations in leaf dust accumulation, foliage and pigment attributes in fruiting plant species exposed to particulate pollution from multan. *Agr. Res.* 3, 1-12.
- Vega E., Eidels S., Ruiz H., López-Veneroni D., Sosa G., González E., Gasca J., Mora V., Reyes E., Sánchez-Reyna G., Villaseñor R., Chow J.C., Watson J.G. y Edgerton S.A. 2010. Particulate air pollution in Mexico City: A detailed view. *Aerosol Air Qual. Res.* 10, 193–211.
- Van Assche, F. y Clijsters H. 1985. Inhibition of photosynthesis in zinc effects on electron transport and photophosphorylation. *Physiol. Plant.* 717-721.
- Vassilev A. y Yordano I. 1997. Reductive analysis of factors limiting growth of Cadmium-Treated plants: a Review. *Bulg. J. Plant. Physiol.* 23, 114–133.
- Vázquez C., Beristain F. y Audelo E. Caracterización del patrón de comportamiento de las partículas en suspensión en el valle de México. *Información Tecnológica.* 23 (3), 3-10. Accedido el 12 de enero, 2015 desde:
<http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v23n3/art02.pdf>
- Vázquez-Yanes, C., A. I. Batis Muñoz, M. I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez Dirzo. 1999. Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación. Reporte técnico del proyecto J084. CONABIO - Instituto de Ecología, UNAM. Accedido el 18 de julio, 2014, desde:
http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/J084_Fichas%20de%20Especies.pdf

CONCLUSIONES GENERALES DE LA TESIS

- Las concentraciones de las partículas de Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Cadmio (Cd) encontradas superficialmente en el follaje de *Fraxinus uhdei* (Wenz.) fueron mayores que las intracelulares. El único caso en donde la concentración intracelular superó la superficial fue para el Níquel (Ni).
- Tanto en los bosques como en las épocas estacionales las concentraciones superficiales fueron mayores que las intracelulares, cercano al 50%.
- A lo largo del año se presentaron dos oscilaciones en las concentraciones superficiales e intracelulares promedio. Las más altas fueron en primavera-verano mientras que en otoño-invierno fueron menores, a excepción del Cadmio (Cd) superficial que fue más alto en otoño-invierno.
- El bosque de Chapultepec tuvo las concentraciones superficiales promedio más altas de Níquel (Ni), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Cadmio (Cd).
- El parque Naucalli tuvo las concentraciones intracelulares promedio más altas en todos los elementos excepto Cadmio (Cd) y Plomo (Pb).
- El bosque de Tlalpan tuvo las concentraciones superficiales promedio más altas de Zinc (Zn).
- Se encontró que en los tres bosques existe una relación de las concentraciones superficiales promedio de Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) determinadas por las distancias a las avenidas circundantes, la dirección del viento y la época estacional.
- Se encontró una relación causa-efecto del área foliar, área foliar específica, peso seco de las hojas y del incremento del diámetro determinado por las concentraciones superficiales e intracelulares promedio de Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) los periodos de primavera, otoño e invierno.

- El parque Naucalli tuvo las concentraciones superficiales promedio más altas de Fosforo (0.22%) y Potasio (1.06%). Y el bosque de Tlalpan las de nitrógeno total (2.06%)

ANEXOS

Registro fotográfico de las actividades realizadas en la investigación.



Garrocha adaptada con una tijera para podar y una hielera para transportar las hojas colectadas.



Potenciómetro modelo Hanna pH 210 empleado para la medición del pH de las muestras de suelo.



Medición de diámetro a la altura del pecho (DAP) con cinta diamétrica



Medición del área foliar mediante el equipo Li-cor modelo Li-3100C

Procesamiento de muestras con ácido nítrico (HNO_3)



1.- Pesado.



2.- Secado de las hojas en estufa a 70 °C.



3.- Pulverizado de las hojas, mediante molino eléctrico.



4.- Recolección del pulverizado de hojas.



5.- Acomodo de muestras con HNO_3 en el rotor del equipo digestor.



6.- Equipo digestor Multiwave, modelo 3000.



7.- Liberación de vapor de HNO_3 de las muestras dentro de la campana.



8.- Dilución del HNO_3 de las muestras aforando con agua deionizada.

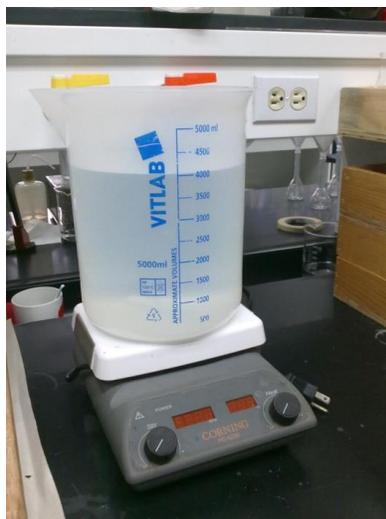


9.- Lectura de muestras en el equipo ICP.

Procesamiento de muestras con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA)



1.- Pesado.



2.- Preparación del EDTA.



3.- Lavado con EDTA.



4.- Colecta del lavado.



5.- Lectura de muestras en el equipo ICP.

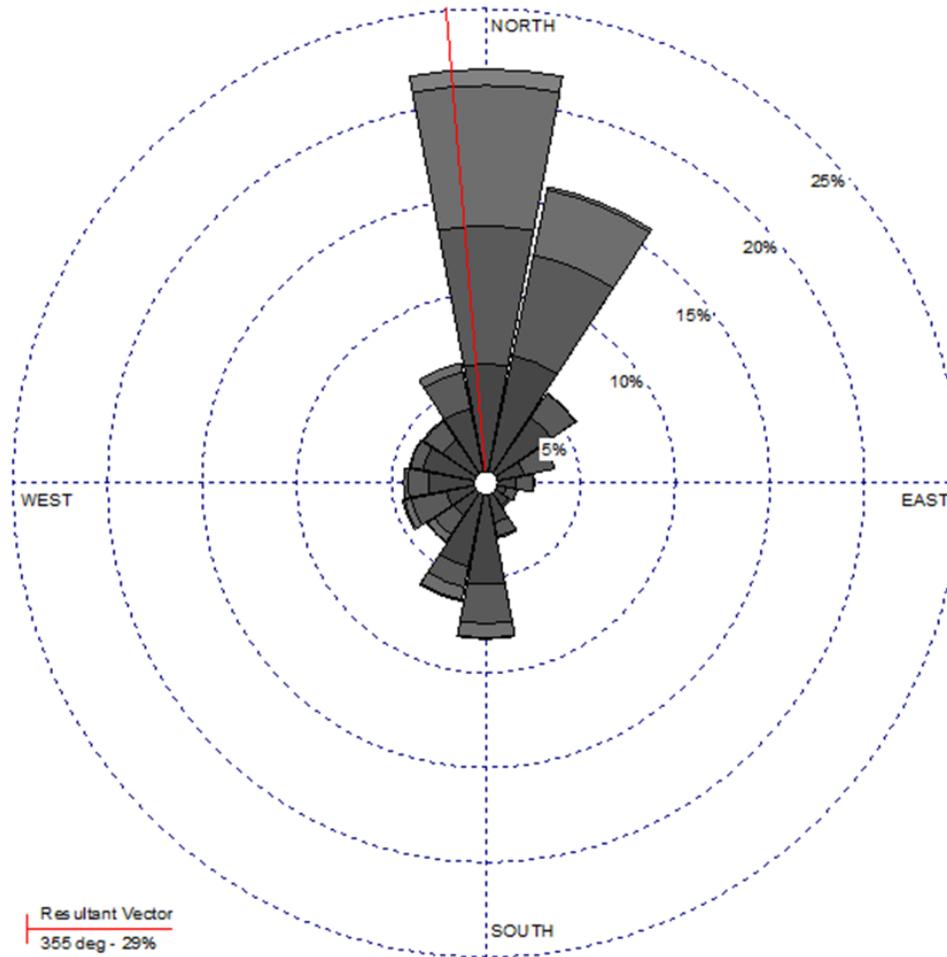
Rosas de vientos generados para el parque Naucalli y los bosques Tlalpan y Chapultepec en los periodos otoño - invierno de 2011 y primavera - verano 2012.

- El software utilizado para genera estos gráficos fue Lakes Environmental WRPLOT View - Freeware V.7.0 . Disponible en:
<http://www.weblakes.com/products/wrplot/>
- La dirección del viento se consideró a partir de los vectores resultantes los cuales se basan en los ángulos predominantes por bosque y periodo estacional, aunado a esto el vector expresa el porcentaje de los ángulos que predominaron.
- La escala de grises indica los rangos en los que se clasifico la velocidad del viento (m/s) y además se reporta un promedio estimado por bosque y época del año.

WIND ROSE PLOT:
Station #48415

DISPLAY:
Wind Speed
Direction (blowing from)

COMMENTS:
Parque Naucalli, época estacional primavera



WIND SPEED (m/s)

- >= 11,1
- 8,8 - 11,1
- 5,7 - 8,8
- 3,6 - 5,7
- 2,1 - 3,6
- 0,5 - 2,1

Calms: 2,28%

DATA PERIOD:
Start Date: 21/03/2012 - 00:00
End Date: 21/06/2012 - 23:00

TOTAL COUNT:	CALM WINDS:
2229 hrs.	2,28%

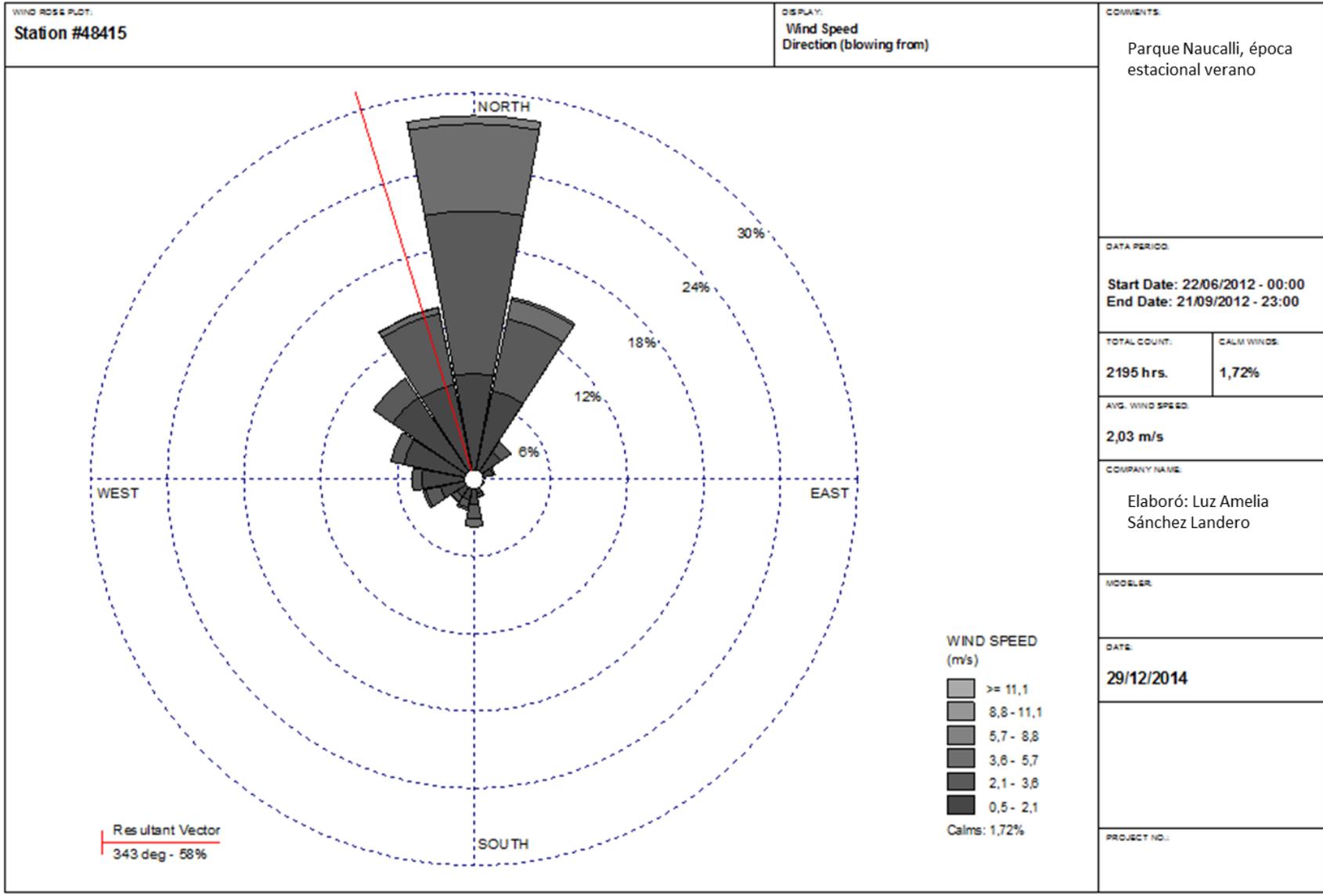
AVG. WIND SPEED:
2,11 m/s

COMPANY NAME:
Elaboró: Luz Amelia Sánchez Landero

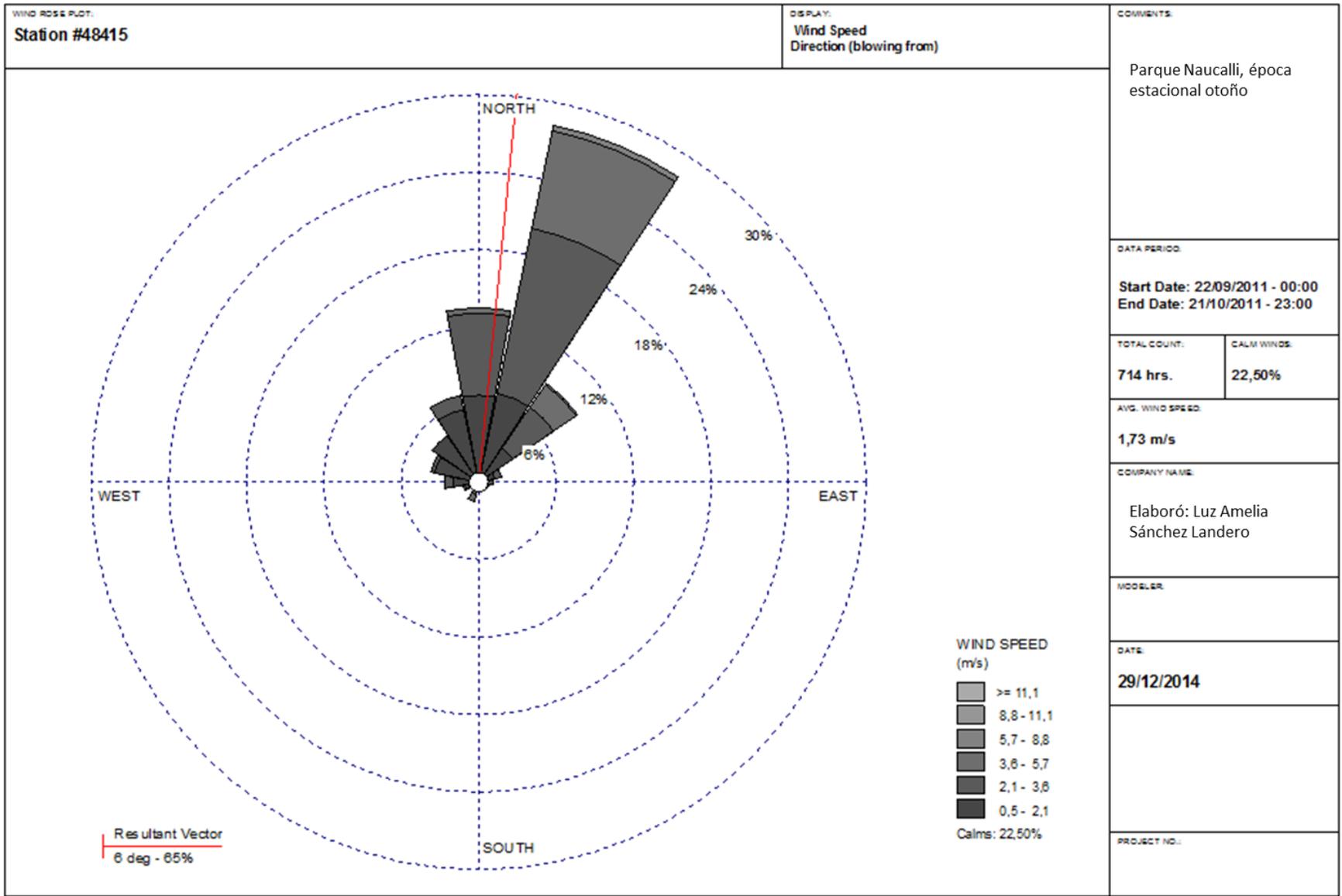
MODELER:

DATE:
29/12/2014

PROJECT NO.:



WRPLOT View - Lantek Environmental Software

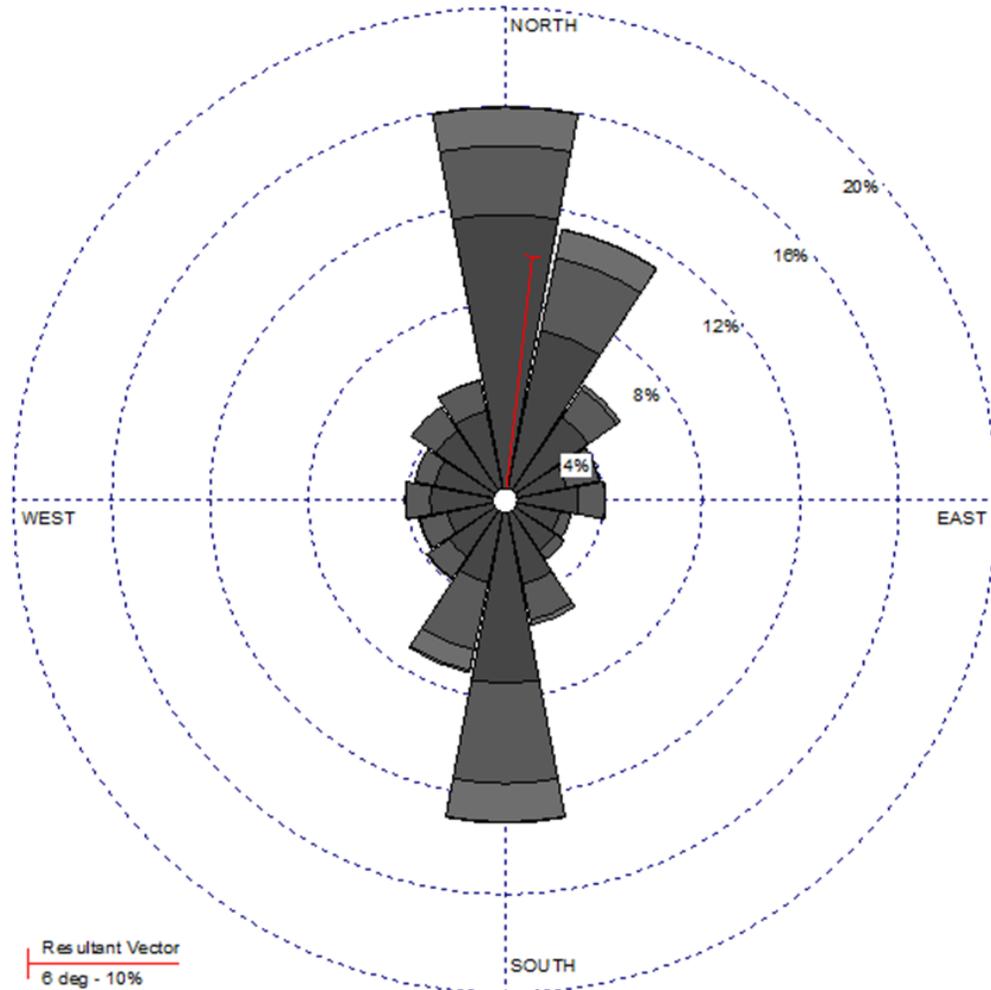


WRPLOT Vase - Lakes Environmental Software

WIND ROSE PLOT:
Station #48415

DISPLAY:
Wind Speed
Direction (blowing from)

COMMENTS:
Parque Naucalli, época estacional invierno



DATA PERIOD:
Start Date: 22/10/2011 - 00:00
End Date: 20/03/2012 - 23:00

TOTAL COUNT:	CALM WINDS:
3507 hrs.	3,15%

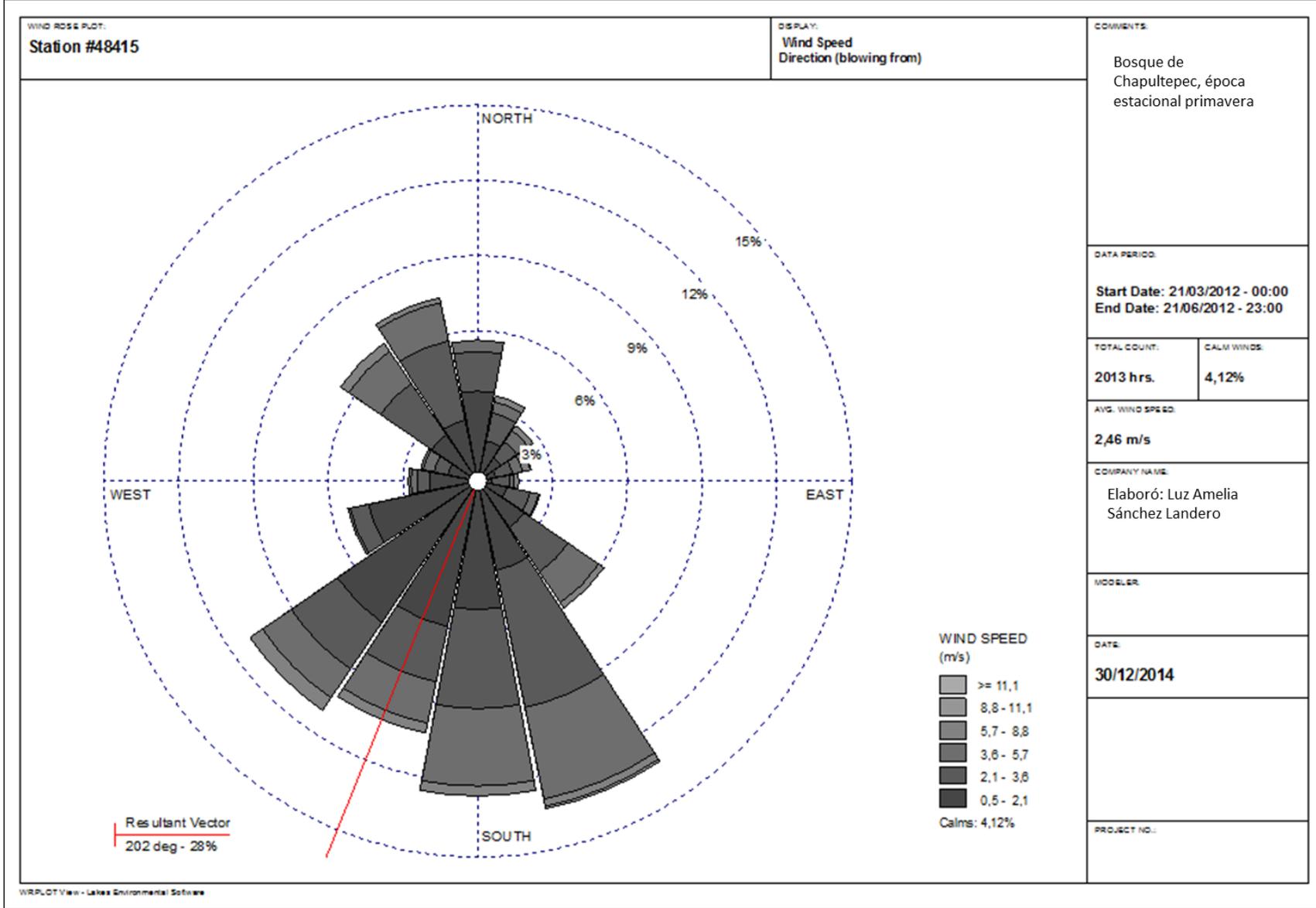
AVG. WIND SPEED:
1,68 m/s

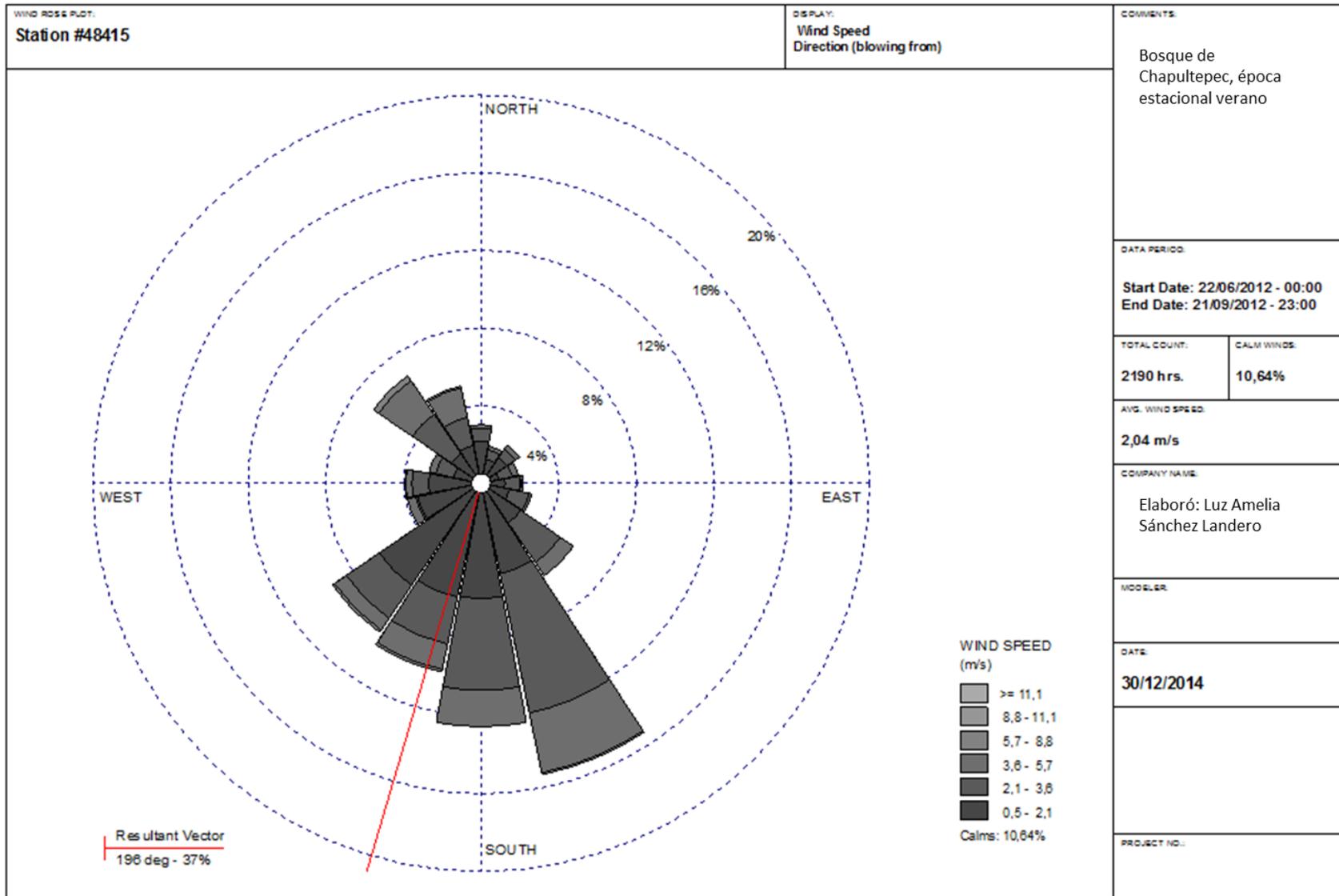
COMPANY NAME:
Elaboró: Luz Amelia Sánchez Landero

MODELER:

DATE:
29/12/2014

PROJECT NO.:



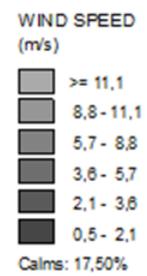
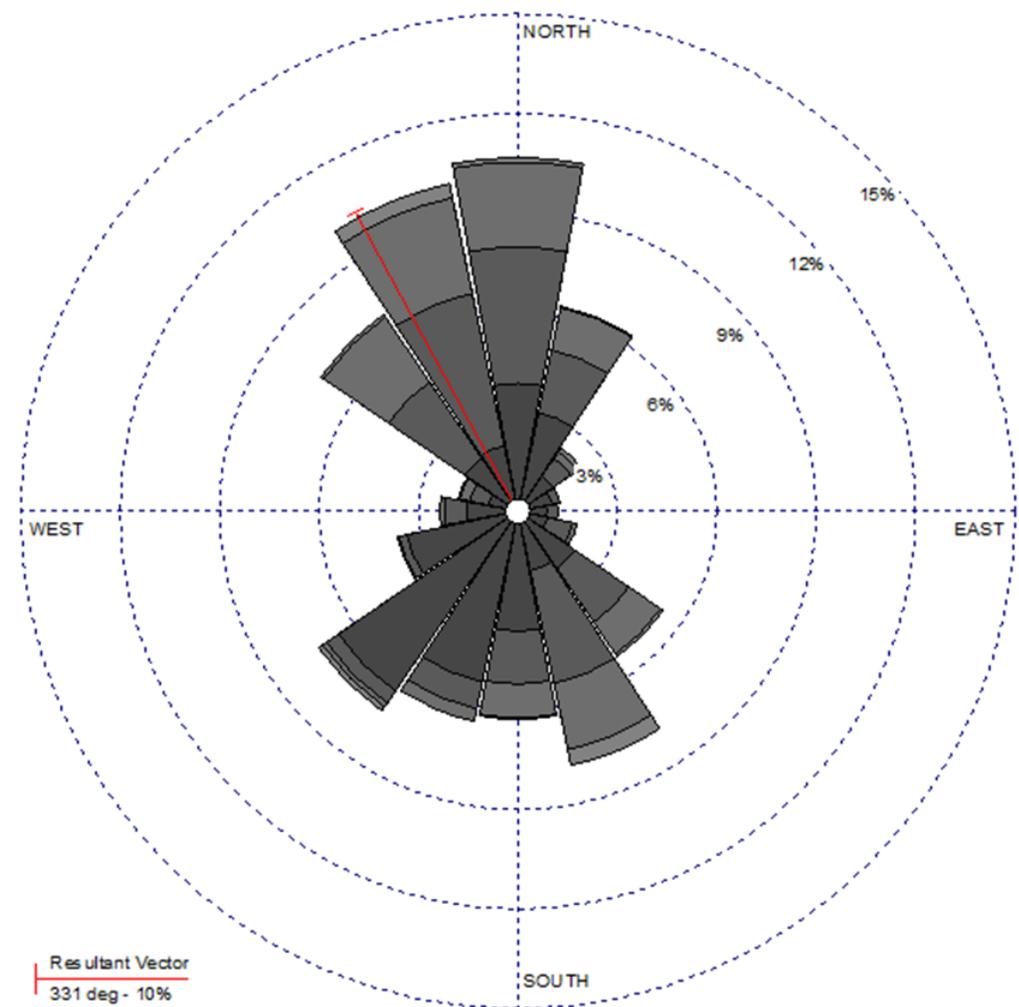


WRPLOT View - Latax Environmental Software

WIND ROSE PLOT:
Station #48415

DISPLAY:
Wind Speed
Direction (blowing from)

COMMENTS:
Bosque de Chapultepec, época estacional otoño



Resultant Vector
331 deg - 10%

DATA PERIOD:
Start Date: 22/09/2011 - 00:00
End Date: 20/12/2011 - 23:00

TOTAL COUNT:	CALM WINDS:
2077 hrs.	17,50%

AVG. WIND SPEED:
1,97 m/s

COMPANY NAME:
Elaboró: Luz Amelia Sánchez Landero

MODELER:

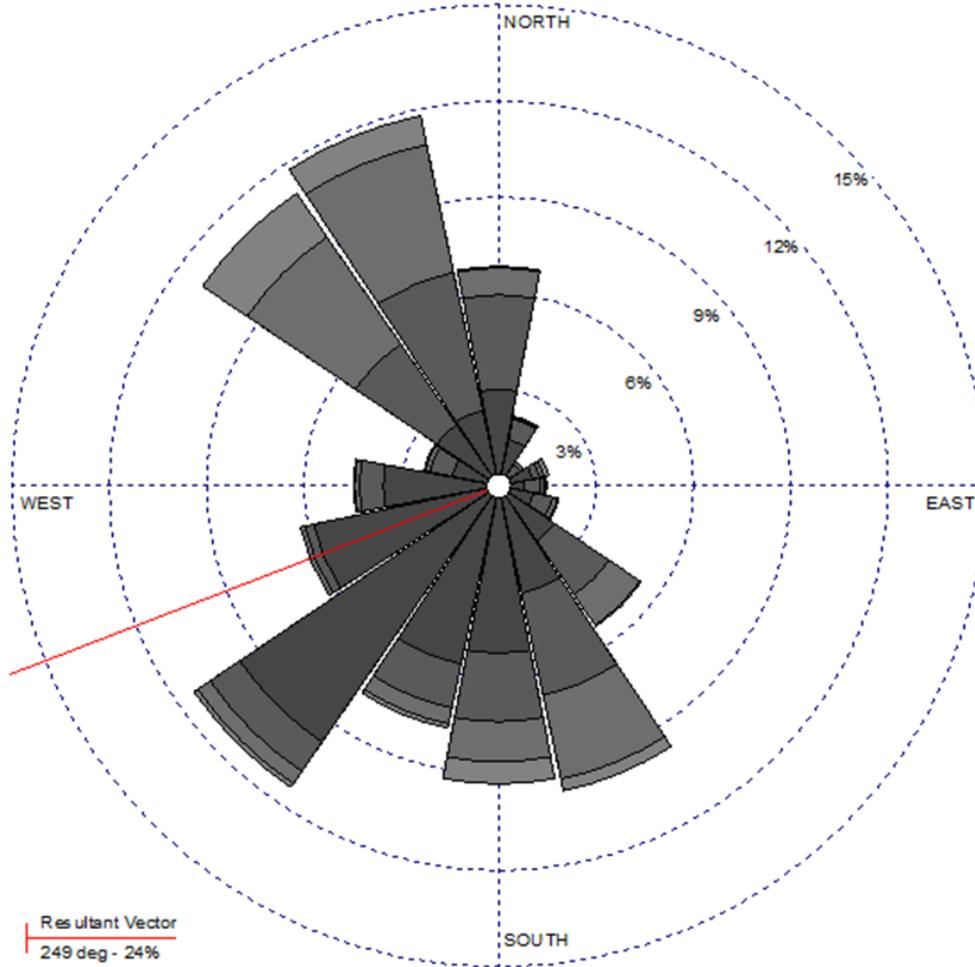
DATE:
30/12/2014

PROJECT NO.:

WIND ROSE PLOT:
Station #48415

DISPLAY:
Wind Speed
Direction (blowing from)

COMMENTS:
Bosque de Chapultepec, época estacional invierno



Resulant Vector
249 deg - 24%

WIND SPEED (m/s)

- >= 11,1
- 8,8 - 11,1
- 5,7 - 8,8
- 3,6 - 5,7
- 2,1 - 3,6
- 0,5 - 2,1

Calms: 5,91%

DATA PERIOD:
Start Date: 21/12/2011 - 00:00
End Date: 20/03/2012 - 23:00

TOTAL COUNT:	CALM WINDS:
2168 hrs.	5,91%

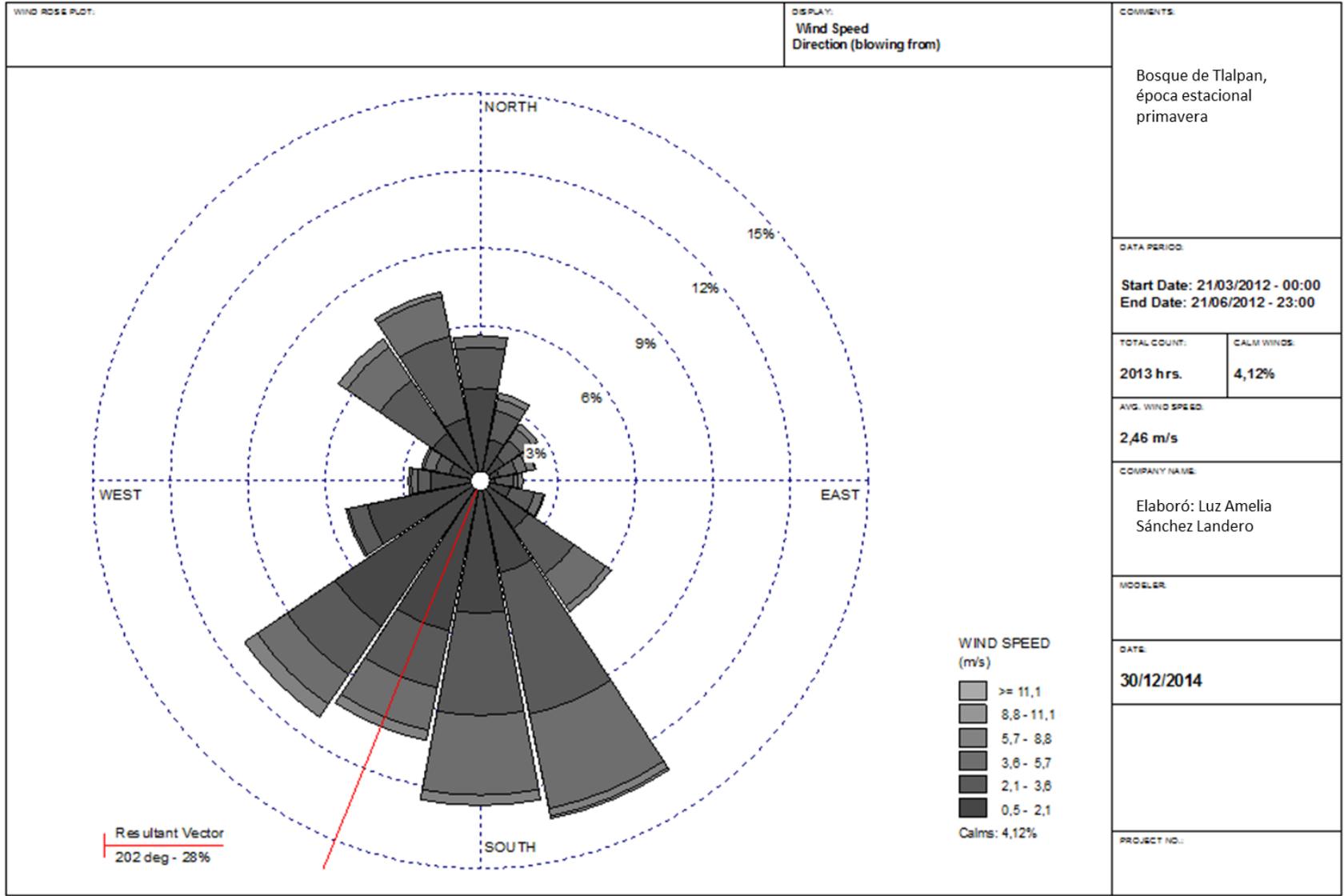
AVG. WIND SPEED:
2,31 m/s

COMPANY NAME:
Elaboró: Luz Amelia Sánchez Landero

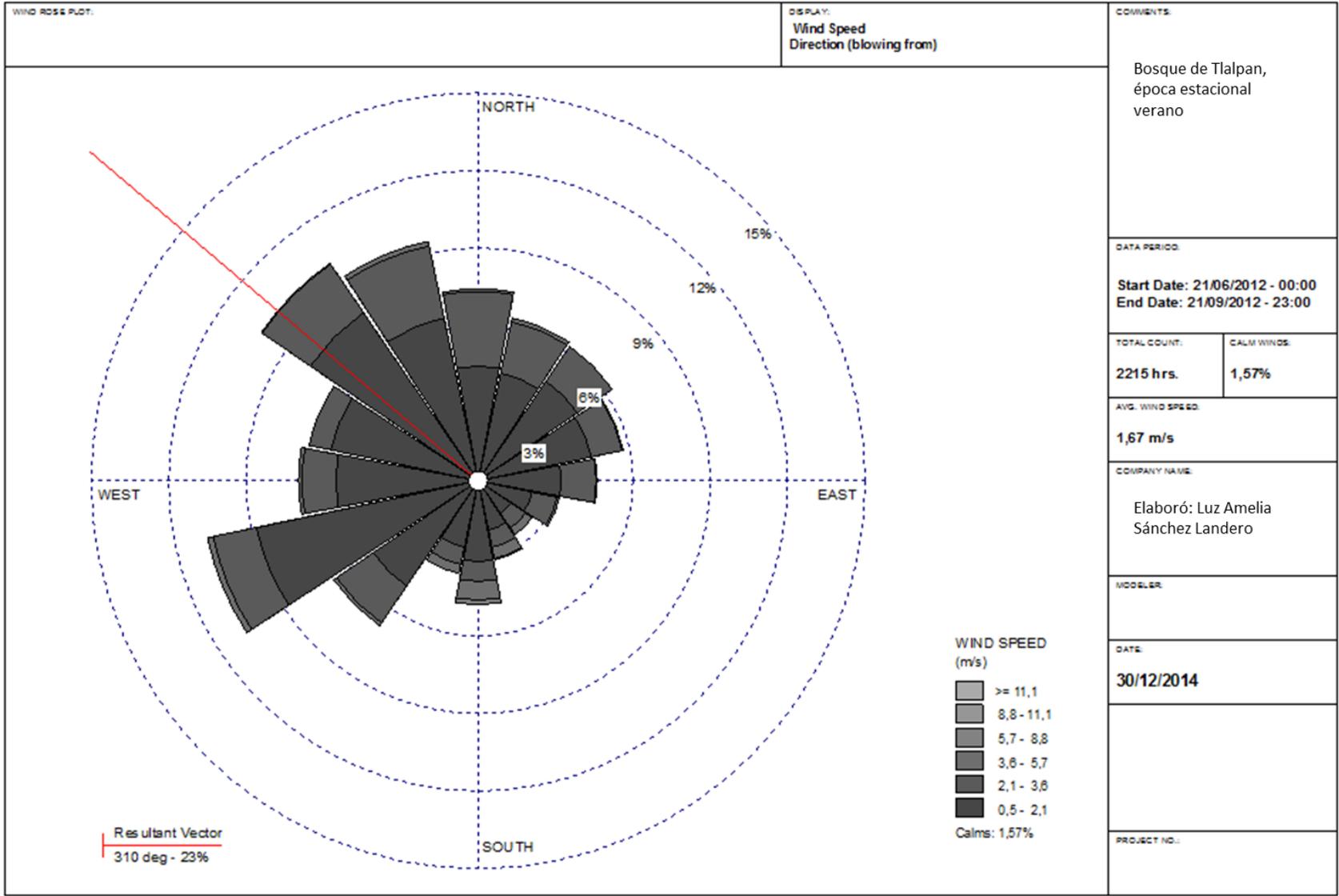
MODELER:

DATE:
30/12/2014

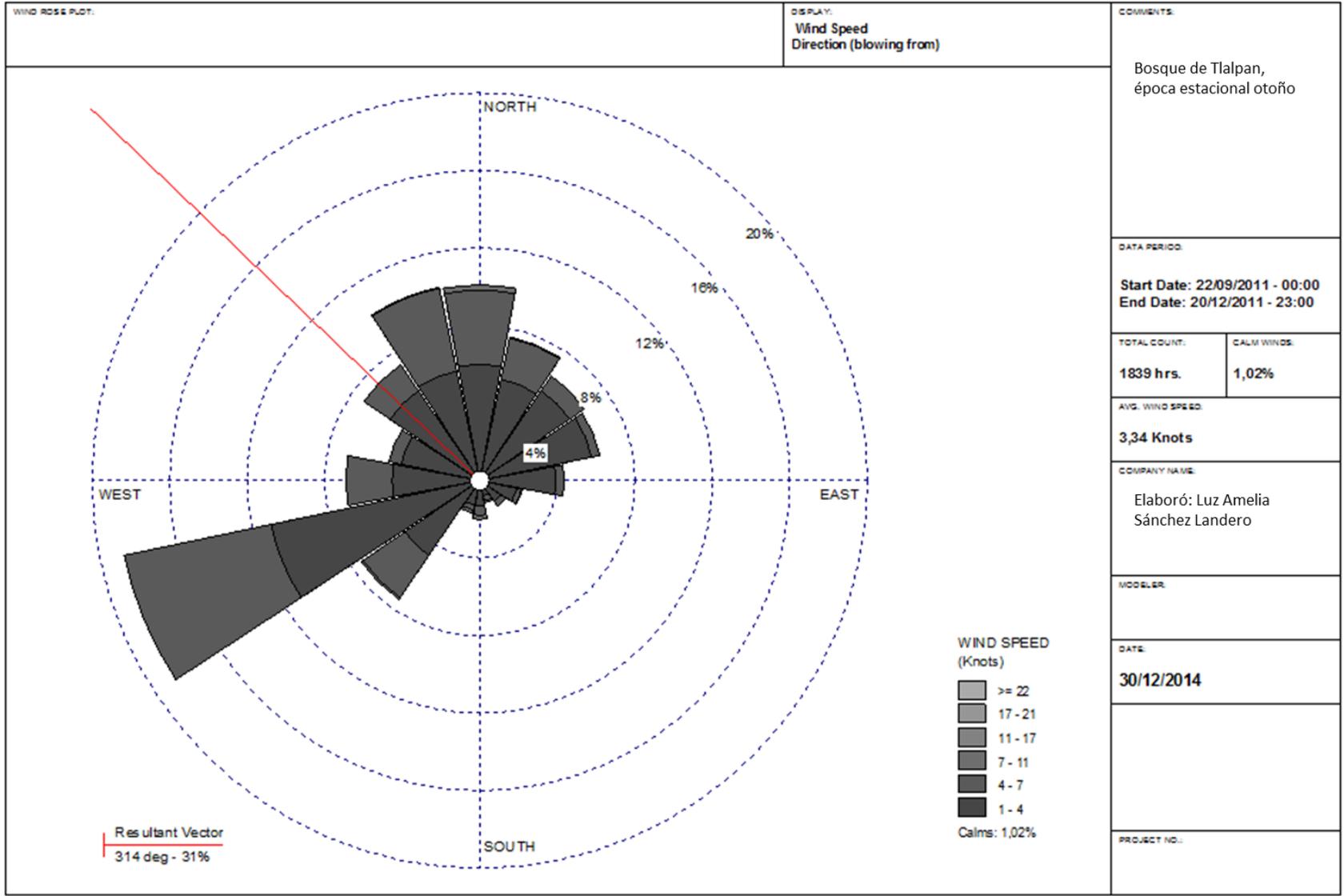
PROJECT NO.:



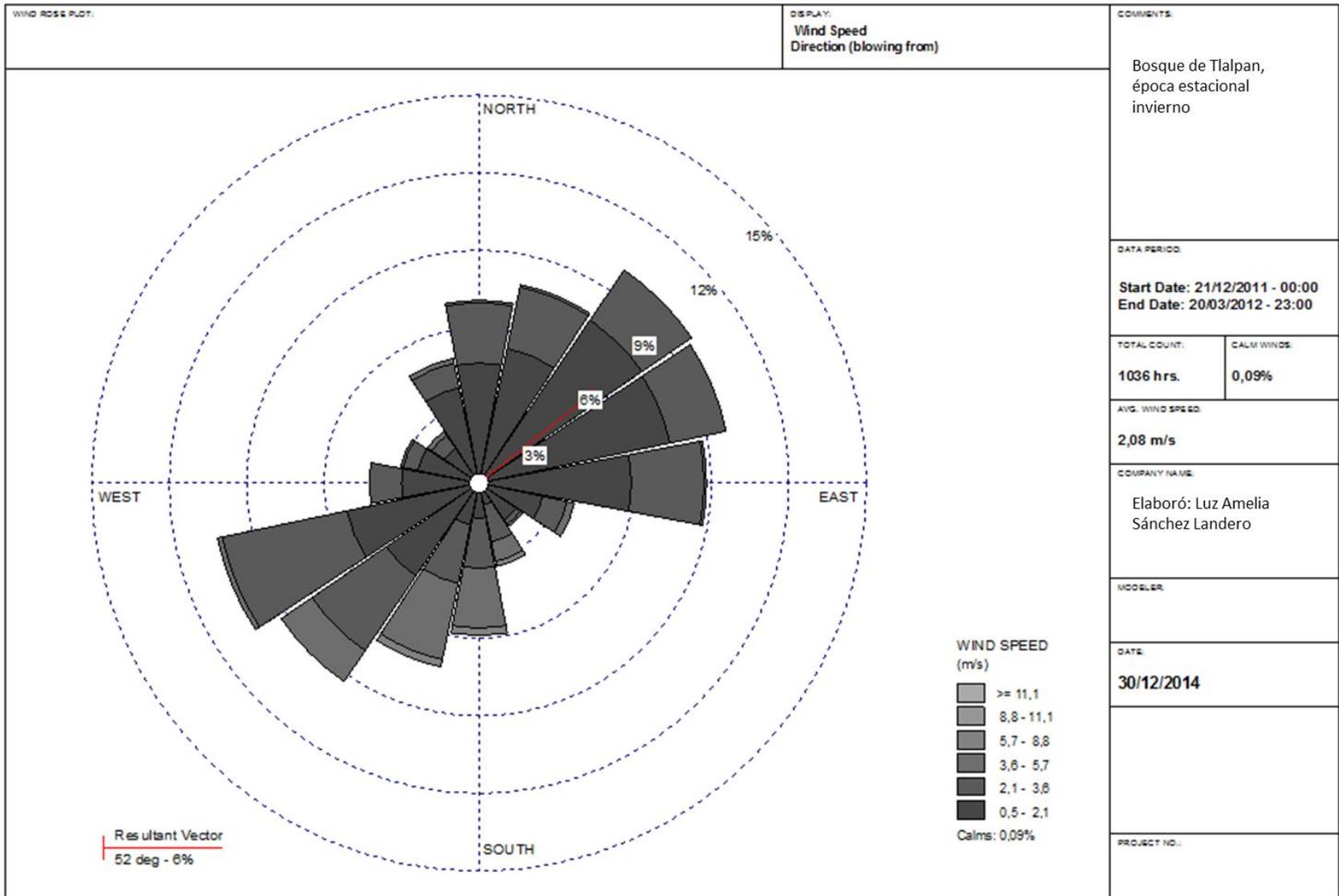
WRPLOTView - Lakes Environmental Software



WRPLOTView - Lakes Environmental Software



WRPLOTView - Lakes Environmental Software



WRPLOT View - Lakes Environmental Software