

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

LABORATORIO DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

**COMPARACIÓN DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y METALES PESADOS
UTILIZANDO CORTEZA DE OYAMEL [*Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham.]
EN UN PARAJE DEL PARQUE NACIONAL IZTACCÍHUATL – POPOCATÉPETL
Y PARQUE NACIONAL EL CHICO.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

B I Ó L O G A

PRESENTA:

ANAYELI GARCIA SALAS

DIRECTOR: M. EN C. GERMÁN CALVA VÁZQUEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas

Tesis Digitales

Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

"ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

**JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
PRESENTE.**

Comunico a usted que la alumna **GARCIA SALAS ANAYELI**, con número de cuenta **410004708**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **30 de junio de 2015** a las **13:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

PRESIDENTE M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL

VOCAL M. en C. GERMÁN CALVA VÁZQUEZ

SECRETARIO BIÓL. ELVIA GARCÍA SANTOS

SUPLENTE BIÓL. MARICELA ARTEAGA MEJÍA

SUPLENTE BIÓL. IRENE CASTILLO CHAIRES

El título de la tesis que presenta es: **COMPARACIÓN DEL DEPÓSITO ATMOSFÉRICO Y METALES PESADOS UTILIZANDO CORTEZA DE OYAMEL [*Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham.] EN UN PARAJE DEL PARQUE NACIONAL IZTACÍHUATL-POPOCATÉPETL Y PARQUE NACIONAL EL CHICO.**

Opción de titulación: Tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HARÁ EL ESPÍRITU"
México, D. F., a 26 de mayo de 2015

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ

DIRECTOR
ZARAGOZA
DIRECCIÓN

RECIBI
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL
JEFE DE CARRERA



DEDICADO A.

Mis padres

María del Carmen y Joel



AGRADECIMIENTO.



La **Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** por la oportunidad de formarme profesionalmente y de conocer a personas extraordinarias que cambiaron mi vida.

Mi madre, **María del Carmen** por su apoyo incondicional desde el primer momento en que decidí estudiar biología, por creer en mí y estar conmigo siempre, por sus desvelos, preocupaciones y enseñarme a luchar por mis sueños ¡Gracias mamá!

Mi padre, **Joel** por creer en mí dándome todo su apoyo, trabajo y esfuerzo para lograr esta meta.
¡Gracias papá!

Mi hermano, **Diego** por preocuparte y estar al pendiente de mí cuando salía a campo.

Mis tías, **Silvia y Esther** por su cariño y apoyo incondicional.

Verónica Monserrat, colega pero sobre todo amiga, por mostrarme el maravilloso mundo de la biología, por tus asesorías cuando no entendía los temas y todo el apoyo brindado para la realización de ésta tesis. Gracias por estar conmigo en mis momentos de risas y lágrimas, te admiro mucho.

Luis Gerardo, por compartir clases, risas, metas, sueños, ideas y proyectos, por escucharme y tener siempre las palabras adecuadas para hacerme seguir adelante. Valoro mucho tu amistad, te quiero...

Germán Jesús, por escucharme y tener siempre palabras de aliento al sentir que caía, por mostrarme la vida de manera distinta y hacerme ver que puedo ser más fuerte de lo que pienso. Te quiero mucho...

Cecilia Arisbeth, María de los Ángeles, Karla Berenice y Juan Antonio, por los momentos de estudio compartido, por las risas, lágrimas y anécdotas que guardaré siempre en mi memoria,
¡Gracias por su valiosa amistad!



Carolina, Vanessa, María Teresa y Francisco Azariel, por la dicha de conocerlos y convertirse en parte importante de mi vida, por todas las risas, buenos momentos y su apoyo siempre incondicional. ¡Los quiero!



Gabriel de Jesús, por permitirme entrar a tu vida y llenar la mía de alegría; la distancia nunca ha sido un impedimento para sentir tu apoyo incondicional, ya que solo nosotros sabemos estar distancientemente juntos... ¡te quiero!

Mis colegas y compañeros del Laboratorio de Contaminación Atmosférica, **Yareli, Mayra, Sara Ivonne, Yesenia, Graciela, Ernesto y Elías Rafael**, por su apoyo en la realización del presente trabajo y los momentos compartidos.

Mi director de tesis, **M. en C. Germán Calva Vázquez** por el espacio brindado en el laboratorio y permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por compartir conmigo su conocimiento, sabiduría y experiencia, por su profesionalismo, tiempo y esfuerzo en mi formación, por trasmitirme la pasión hacia los bosques y enseñarme que aún hay mucho que estudiar de ellos. Agradezco además, sus palabras puntuales y consejos personales que me ayudaron a superar miedos y tristezas para crecer y ser feliz. Todo mi respeto y profunda admiración hacia usted siempre.

Mis sinodales, **M. en C. Armando Cervantes Sandoval y Biólogas Elvia García Santos, Maricela Arteaga Mejía e Irene Castillo Chaires**, por sus aportes puntuales para enriquecer el presente trabajo. Mi respeto y admiración.

Biól. Aida Zapata Cruz, por el tiempo y espacio en el laboratorio de servicios de la carrera de biología (Absorción atómica) para la lectura de metales pesados.

Para que surja lo posible, es preciso intentar una y otra vez lo imposible

Hermann Hesse





*El que cree, crea; el que crea,
hace; el que hace, se transforma a sí mismo
y a la sociedad en la que vive.*

Proverbio maya



Resumen.....	XII
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes.....	4
3. Problemática.....	7
4. Justificación.....	9
5. Objetivos.....	10
5.1 General.....	10
5.2 Específicos.....	10
6. Hipótesis.....	11
7. Marco teórico.....	12
7.1 Depósito atmosférico húmedo y seco: Definición.....	12
7.2 Historia de la lluvia ácida.....	13
7.3 Causas de la acidificación.....	13
7.4 Reacciones químicas durante la formación de la lluvia ácida.....	15
7.5 Estado de la calidad del aire en el Valle de México.....	17
7.6 Efectos de la lluvia ácida en los bosques.....	18
7.7 <i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl et Cham.....	18
7.8 Corteza arbórea.....	19
7.9 Corteza como biomonitor de depósito atmosférico y metales pesados.....	20
7.10 Propiedades de los metales pesados.....	21
7.11 Efectos tóxicos específicos de los metales pesados en diferentes especies vegetales.....	23
8. Áreas de estudio.....	25
8.1 Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.....	25
8.1.1 Localización.....	25
8.1.2 Clima.....	26
8.2 Parque Nacional El Chico.....	26
8.2.1 Localización.....	26
8.2.2 Clima.....	27



8.2.3	Vegetación.....	28
8.2.3.1	Bosque de Oyamel.....	28
9.	Material y método.....	30
9.1	Corteza de <i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl et Cham.....	30
9.2	Fase de campo.....	30
9.3	Fase de laboratorio.....	33
9.3.1	Método para la determinación de acidez.....	33
9.3.2	Método para la determinación de metales pesados	35
9.4	Análisis estadístico.....	36
10.	Resultados y discusión.....	38
10.1	Km 16.5 carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl...38	
10.2	Paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico, Hidalgo.....	38
10.3	Potencial de Hidrógeno (pH).....	39
10.4	Capacidad amortiguadora (β) de la corteza arbórea.....	50
10.5	Conductividad eléctrica (λ).....	54
10.6	Metales pesados.....	61
11.	Conclusiones.....	75
12.	Recomendaciones.....	76
13.	Literatura citada.....	77



Figura 1. Vientos dominantes de la Cuenca de México. Tomado de Calva & Corona, 1987.....	8
Figura 2. Depósito atmosférico. 1) Los contaminantes primarios son lanzados a la atmósfera, 2) Allí llevan a cabo procesos de transporte y transformación (contaminantes secundarios), 3) Finalmente descienden como depósito atmosférico seco y, 4) Depósito atmosférico húmedo. Tomada de https://www.blendspace.com/lessons/GoBiQ_Ob_ZfQng/acid-deposition	12
Figura 3. <i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl et Cham.....	19
Figura 4. Partes del tronco. Tomada de CES (1997).....	20
Figura 5. Localización del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl. Tomada de DOF (2013).....	25
Figura 6. Localización del Parque Nacional El Chico. Tomada de CONANP (2005).....	27
Figura 7. Corteza de <i>Abies religiosa</i> (H.B.K.) Schl et Cham.....	30
Figura 8. Localización del Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.....	31
Figura 9. Localización del paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico.....	31
Figura 10. Colecta de corteza de <i>Abies religiosa</i>	32
Figura 11. Método colecta de corteza.....	33
Figura 12. Método para la determinación de acidez.....	35
Figura 13. Método para la cuantificación de metales pesados.....	36
Figura 14. Sitio de muestreo Km 16.5 carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.....	38
Figura 15. Sitio de muestreo paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico, Hidalgo.....	39
Figura 16. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos periodos.....	44
Figura 17. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> en el paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos periodos.....	46
Figura 18. Comparación de Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y	



paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H). La línea roja representa el promedio de pH para ambos parajes47



Figura 19. Comparación de Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos parajes48

Figura 20. Comparación de medias de potencial de hidrógeno (pH) y protones H^+ registrados en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....49

Figura 21. Comparación de la capacidad amortiguadora (β) de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para los periodos húmedo y seco.....52

Figura 22. Capacidad amortiguadora de corteza de (β) de *Quercus robur*. (Stäxang, 1969 Oikos 20:2:16).....53

Figura 23. Capacidad amortiguadora (β) de corteza de *Quercus robur* L. (Grodzinska, 1977. Water, Air and Soil Pollution 8:3-7).....53

Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio λ para ambos periodos.....56

Figura 25. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en el paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio λ de para ambos periodos.....57

Figura 26. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H). La línea roja representa el promedio λ para ambos parajes.....58

Figura 27. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo seco (S). La línea roja representa el promedio λ para ambos parajes.....59



Figura 28. Comparación de medias por para la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de <i>Abies religiosa</i> de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	60
Figura 29. Comparación de las concentraciones de Cd (mgKg^{-1}) en corteza de <i>Abies religiosa</i> para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	64
Figura 30. Comparación de medias para el metal cadmio (Cd) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	65
Figura 31. Comparación de las concentraciones de Cu (mgKg^{-1}) en corteza de <i>Abies religiosa</i> para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	67
Figura 32. Comparación de medias para el metal cobre (Cu) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	68
Figura 33. Comparación de las concentraciones de Pb (mgKg^{-1}) en corteza de <i>Abies religiosa</i> para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	70
Figura 34. Comparación de medias para el metal plomo (Pb) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	71
Figura 35. Comparación de las concentraciones de Zn (mgKg^{-1}) en corteza de <i>Abies religiosa</i> para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	73
Figura 36. Comparación de medias para el metal zinc (Zn) registrado en corteza de <i>Abies religiosa</i> de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S).....	74





Cuadro 1. Propiedades de los metales: Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Modificado de Reimann & Caritot, 1998 (En Marín, 2008).....	23
Cuadro 2. Valores máximos, mínimos y promedio registrados de potencial de hidrógeno (pH) en corteza de <i>Abies religiosa</i> por periodo en el Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico.....	40
Cuadro 3. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de Pináceas (Calva <i>et. al.</i> , 2006)....	40
Cuadro 4. Variación del potencial de hidrógeno del agua de lluvia en el bosque de <i>Abies religiosa</i> del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico (López, 2010).....	42
Cuadro 5. Intervalos de confianza en escala pH a partir de H^+ para el bosque de <i>Abies religiosa</i> del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco.....	50
Cuadro 6. Capacidad media amortiguadora (CMA β) en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo y seco.....	51
Cuadro 7. Valores máximos, mínimos y promedio registrados de conductividad eléctrica (λ) en corteza de <i>Abies religiosa</i> por periodo en el Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico.....	54
Cuadro 8. Concentración promedio de Cd, Cu, Pb y Zn ($mgKg^{-1}$) en corteza de <i>Abies religiosa</i> , de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en el periodo húmedo y seco	61
Cuadro 9. Concentración promedio de los metales Cd, Cu, Pb y Zn ($mgKg^{-1}$) en corteza de <i>Pinus spp</i> (Rocha, 2014).....	62
Cuadro 10. Rangos normales de Cd, Cu, Pb y Zn en plantas (Pais & Benton, 1997).....	63



RESUMEN



A nivel internacional el depósito atmosférico ácido y metales pesados producto de las actividades humanas están causando graves daños a la vegetación, pues los contaminantes emitidos desde fuentes fijas y móviles tienen la capacidad de viajar cientos de kilómetros hasta depositarse. En México, Calva et al., 2006 han reportado este fenómeno en los bosques de pino, cedro y oyamel de la Cuenca del Valle México. El depósito atmosférico húmedo mejor conocido como lluvia ácida, engloba cualquier forma de precipitación en la que esté presente ácido sulfúrico y ácido nítrico en elevadas concentraciones; el depósito atmosférico seco se presenta en forma de partículas que impactan sobre la superficie terrestre. Aunque de manera natural se liberan compuestos a la atmósfera que dan origen a depósito atmosférico ácido; las actividades antropogénicas brindan el mayor aporte. Por lo anterior, en el presente estudio se analizó la corteza de 30 árboles de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham de los parajes Km 16.5 de la carretera a Paso de Cortés (CPC), Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl (Edo. Méx.) y El Cedral, Parque Nacional El Chico (Hidalgo) durante los meses Septiembre – Octubre 2012 (periodo húmedo) y Marzo – Abril 2013 (periodo seco), con la finalidad de determinar el depósito atmosférico ácido y metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn mgKg⁻¹) que estos ecosistemas boscosos reciben. Para la determinación de acidez se emplearon técnicas de potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (λ) y capacidad amortiguadora (β). Los resultados muestran que el Cedral presentó mayor aporte de acidez en los periodos húmedo ([0.7 H⁺]) y seco ([0.8 H⁺]); mientras que el Km 16.5 CPC exhibió la mayor cantidad de sales en los mismos periodos (>310 μ S); la comparación entre el periodo húmedo y el periodo seco, muestra que en ambos Parques Nacionales el periodo húmedo recibe el mayor aporte de acidez y de sales. El bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional El Chico mostró mayor capacidad de soportar los cambios de acidez producto del depósito atmosférico durante el periodo húmedo ($\beta=0.00052$) y el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl durante periodo seco ($\beta=0.00055$). Finalmente, la determinación de metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn mgKg⁻¹) se realizó mediante técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica de Flama (EAA); el Km 16.5 CPC presentó el mayor aporte en los metales Cd (0.13 mgKg⁻¹), Pb (0.48 mgKg⁻¹) y Zn (0.58 mgKg⁻¹) durante el periodo húmedo; no así, durante el periodo seco, donde el Cedral registró el mayor aporte de los metales mencionados. El metal Cu registró el mayor aporte en el Km 16.5 CPC (0.00023 mgKg⁻¹) durante el periodo seco.

Palabras clave: Corteza, depósito atmosférico, acidez, metales pesados.



1. INTRODUCCIÓN



A nivel nacional no hay un programa de monitoreo específico para lluvia ácida; sin embargo, en la década de los ochenta se realizaron las primeras investigaciones sobre su presencia, caracterización y efectos en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). En 1987 comenzó su monitoreo sistematizado, pero es hasta 2001 que se consolidó la Red de Depósito Atmosférico (REDDA), y posteriormente se integró al Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México (SIMAT). En el año 2006, la REDDA estaba formada por 16 estaciones de monitoreo distribuidas en las áreas urbana, rural y de conservación ecológica. Actualmente en estas estaciones se registra el pH del agua de lluvia y la concentración de iones presentes en el depósito húmedo (Muñoz *et al.*, 2008).

Los registros históricos en la ZMVM entre 1987 y 1993 indican que en los primeros años del monitoreo, el pH era menos ácido, y fue hasta 1989 cuando se determinó más ácido 3.4 (INE, 2005). Registros de la REDDA muestran valores de pH en un intervalo de 3.65 a 7.58 en 2006 y de 3.89 a 9.36 en 2007 (GDF, 2008), lo que se explica con el aumento de partículas de metales alcalinos. Con respecto a las emisiones de precursores de lluvia ácida, el Inventario de Emisiones (2004) señala que SO_x y NO_x son mayores en la regiones centro, noreste y noroeste, lo cual está asociado con una mayor afluencia vehicular y mayor concentración de industrias asentadas en estas zonas (GDF, 2006).

Debido a los daños que la lluvia ácida causa a los bosques, las cortezas de diferentes especies arbóreas se emplean como receptores pasivos de contaminación atmosférica por sus bondades para retener material particulado y sustancias gaseosas. Su capacidad de acumulación de contaminantes varía según la rugosidad de su superficie (Steubing *et al.*, 2002 en Perelman, 2007).



Si bien las cortezas son utilizadas menos frecuentemente que musgos, líquenes y bromeliáceas epifitas (Jasan *et al.*, 2004 en Perelman, 2006) presentan dos ventajas relevantes: facilidad de muestreo y disponibilidad del recurso. De acuerdo con Martin & Gray (1971) la corteza varía químicamente en relación con la especie de Pino presentando un pH que oscila entre 4.5-5.5. El carácter ácido es debido a:

- I. Presencia de pectinas y ligninas.
- II. Proporción de celulosa (alfa, beta y gamma – holocelulosa, hemicelulosa y oxalacetatos).
- III. Presencia de taninos, alcoholes hidrosolubles y no solubles.

En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6, esta acidez se debe a la cantidad de dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua producto de la evaporación y transpiración de las plantas para formar ácido carbónico. Cuando la lluvia tiene una acidez mayor que la normal (es decir un pH menor a 5.6) se considera como lluvia ácida (SMA, 2009).

La lluvia ácida es diferente a otros tipos de contaminación del aire, no es emitida directamente por las chimeneas y los escapes, se forma a partir de la combinación de contaminantes gaseosos y vapor de agua. El incremento en la acidez del agua de lluvia es consecuencia de las reacciones químicas en la atmósfera entre óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y agua. El nivel de acidez estará determinado principalmente por las cantidades emitidas de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ácidos orgánicos y el balance con el amonio y cationes básicos (SMA, 2009).

La lluvia ácida comparte los mismos precursores que el ozono y las partículas: SO_x y NO_x . Los óxidos de nitrógeno contribuyen en la formación de ozono en presencia de compuestos orgánicos volátiles y luz solar, y tanto los óxidos de azufre como los óxidos de nitrógeno juegan un papel fundamental en la producción de partículas. Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde la fuente de emisión. Este transporte de largo alcance en



combinación con la naturaleza destructiva de los ácidos, hacen que la lluvia ácida tenga una gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (SMA, 2009).



Entre los efectos que la lluvia ácida causa a los ecosistemas forestales se encuentran: reducción del proceso fotosintético, clorosis, defoliación, necrosis, modificación de la actividad enzimática, alteración del metabolismo de lípidos, proteínas y carbohidratos, trayendo como consecuencia reducción en la productividad de los bosques, disminución del crecimiento, baja producción de semillas viables y poca resistencia a enfermedades. También lixivia y arrastra nutrientes del suelo como magnesio, calcio y potasio indispensables para la vida, liberando así el ion aluminio en el suelo, el cual es tóxico para todas las plantas (Godbold *et al.*, 1988 en Granados *et al.*, 2010).

Por otro lado, el empleo de materiales biológicos para vigilar la contaminación atmosférica por metales pesados comenzó a finales del siglo XIX. Desde entonces se han propuesto diversos materiales y organismos para fines de vigilancia biológica, entre ellos musgo, liquen, corteza de árboles, cortes anulares de la corteza, agujas de los pinos, hojas de las plantas, hierbas, helechos o tejidos de animales como plumas, pelo e hígado. La comparación minuciosa de los metales más comúnmente empleados permite llegar a la conclusión de que el musgo y el liquen y en menor grado, la corteza de los árboles son los más idóneos para vigilar los metales pesados en la atmósfera (Bruin, 1990).



2. ANTECEDENTES



El primer estudio que utilizó corteza arbórea como superficie de contacto para la cuantificación de depósito atmosférico ácido, fue llevado a cabo por Staxäng en 1969; la investigadora utilizó diferentes especies de árboles ubicados en sitios expuestos a diferente concentración de contaminantes respecto a la fuente de emisión al sur de Suiza, dando como resultado una relación directa entre el grado de acidez que guarda la corteza y la distancia a la fuente emisora.

En 1977 Grodzinska determinó el pH y la capacidad buffer en corteza de cinco especies de árboles caducifolios, un arbusto y una conífera de una zona industrial al sur de Polonia, comparando los resultados obtenidos con cortezas de un bosque al noreste del mismo país; la investigadora encontró correlación entre la acidez de la corteza y la contaminación atmosférica por SO_2 ; mientras que la capacidad buffer exhibió un aumento en relación directa con la contaminación atmosférica. En ese mismo año Lötschert & Köhm realizaron en Frankfurt, Alemania mediciones de pH, sulfuro y cationes como Ca^{++} , K^+ y Na^+ en corteza de árboles caducifolios, encontrado correlación entre el sulfuro contenido en la corteza y el valor promedio de SO_2 en el aire. Aunado a ello, hallaron una relación inversamente proporcional entre la conductividad eléctrica y el Ca^{++} .

Posteriormente Härtel en 1982, analizó propiedades de la corteza para el monitoreo de contaminantes atmosféricos. El estudio fue enfocado a la interdependencia de aniones y cationes en solución de la corteza expuesta a contaminantes del aire. La investigación consistió en fumigar la corteza con dióxido de azufre en concentraciones diferentes. Concluyendo que el biomonitoreo por medio de la corteza permite un registro retrospectivo de la contaminación y que existen relaciones estadísticamente significativas entre la conductividad eléctrica de la solución de la corteza y las descargas de sulfatos a la atmósfera. Con respecto al pH, el investigador encontró una relación inversa al valor de la conductividad eléctrica. También realizó comparaciones entre



corteza de árboles caducifolios y perennifolios concluyendo que estos últimos poseen relaciones más definidas de las variables antes mencionadas.



Otro estudio acerca de cuantificación de depósito atmosférico, fue realizado por Santamaría & Martín en 1997, durante dos años los investigadores colectaron muestras de corteza de diferentes especies de árboles (caducifolios y perennifolios) en 17 sitios de Navarra, España. Las muestras de corteza fueron analizadas mediante pH y conductividad eléctrica, además de lo anterior a cada árbol le fue evaluado el grado de defoliación de copa. Los resultados mostraron correlación altamente significativa entre el pH y la conductividad eléctrica para todas las especies de árboles excepto en *Pinus sylvestris*. Para *Quercus ilex* encontraron correlación positiva entre el aumento de pH y el grado de defoliación. Por último, los investigadores concluyen que la corteza puede ser utilizada para evaluar las condiciones ambientales del aire a gran escala.

En México, Calva *et al.* 2006 colectaron muestras de corteza de 3 especies de coníferas en 4 diferentes bosques de la Cuenca de México durante 1995 y 1996 a fin de cuantificar el depósito ácido mediante la medición de pH, conductividad eléctrica y capacidad media amortiguadora. Concluyendo que la corteza de pino y oyamel son sensibles a la acidez de la atmósfera de la Cuenca de México, mostrando en temporada lluviosa su mayor registro y además que la acidificación de los ecosistemas forestales en la Cuenca es alta y homogénea, en comparación con las localidades ubicadas fuera de ella (Chico, Hidalgo).

Rocha en 2014, colectó corteza de *Pinus spp* dentro del Parque Nacional en dos diferentes parajes influenciados por la contaminación del Valle de México durante el periodo Septiembre – Octubre 2012 - Marzo – Abril 2013, con la finalidad de cuantificar el potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica, así como también metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) mediante EAA (Espectrometría de Absorción Atómica) de flama. Los resultados muestran para la Zona de San Rafael, en cuanto a pH y conductividad eléctrica valores superiores a los de Pasó de Cortés. Con



respecto a metales pesados, concluye que la concentración es ligeramente mayor en ambas zonas durante el periodo seco.



En relación a la cuantificación de metales pesados como indicadores de contaminación atmosférica utilizando corteza arbórea, se han realizado diversos estudios en todo el mundo.

Lippo *et al.*, 1995 realizaron un comparativo de las concentraciones de los metales pesados Cd, Cu, Pb, Cr, Ni, V, Fe y Zn en musgo, liquen y corteza de *Pinus silvestris* L. a escala nacional en Finlandia por medio de ICP – AES (Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente), encontrando resultados similares para los tres tipos de muestra. Los investigadores concluyen una alta correlación entre el musgo y corteza; no así, entre liquen y corteza.

El-Hasan *et al.* 2002 realizaron el biomonitorio de la Ciudad de Amman utilizando muestras de corteza de 36 ciprés en tres sitios con diferente actividad antropogénica. Como resultado encontraron variaciones en la concentración de Cd, Cu, Cr, Mn, Ni, Pb y Zn debido a que los sitios muestreados tenían diferentes actividades humanas, aunque las emisiones debidas al tráfico, no se mostraron como la principal fuente de emisión de metales. Concluyendo que la corteza de ciprés funciona como biomonitor de contaminación en zonas áridas.

Otro estudio que analiza metales pesados en corteza arbórea, fue realizado por Majolagbe *et al.* 2010 en el que utilizaron la corteza de 10 especies de árboles al suroeste de Nigeria para determinar metales traza como Pb, Cu, Cd, Cr, Zn y Fe por medio de Espectroscopia de Absorción Atómica de flama (EAA). Los valores promedio de Pb, Cu y Zn se correlacionaron con el volumen de tráfico de la zona estudio. Sin embargo, la comparación estadística de algunas localidades de alto y bajo volumen de tráfico no mostró diferencia significativa.



3. PROBLEMÁTICA



El Distrito Federal es una de las regiones más contaminadas de México, 35 mil industrias y 3.5 millones de vehículos con altos consumos de energía fósil (FIMEVICDF, 2012), favorecen la producción de emisiones atmosféricas ácidas y de metales pesados. La dirección de los vientos (Figura 1) lleva los contaminantes a los bosques aledaños, como los ubicados en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en forma de depósito atmosférico ácido húmedo o seco, afectando de manera importante la salud de los ecosistemas forestales; entre ellos el de oyamel.

Debido a que el pinabete como también se le conoce, representa una fuente importante para brindar servicios ambientales, la cuantificación puntual de acidez y de metales pesados que este bosque recibe es de alta relevancia; ya que, de acuerdo con Granados *et al.*, 2010 se ha demostrado que el aumento en la contaminación atmosférica coincide con la expansión de enfermedades en los árboles y que la lluvia ácida puede provocar su muerte.

¿La contaminación atmosférica ácida y metales pesados se verán expresados por medio de la corteza de *Abies religiosa* mostrando diferencia entre la temporada húmeda y seca?



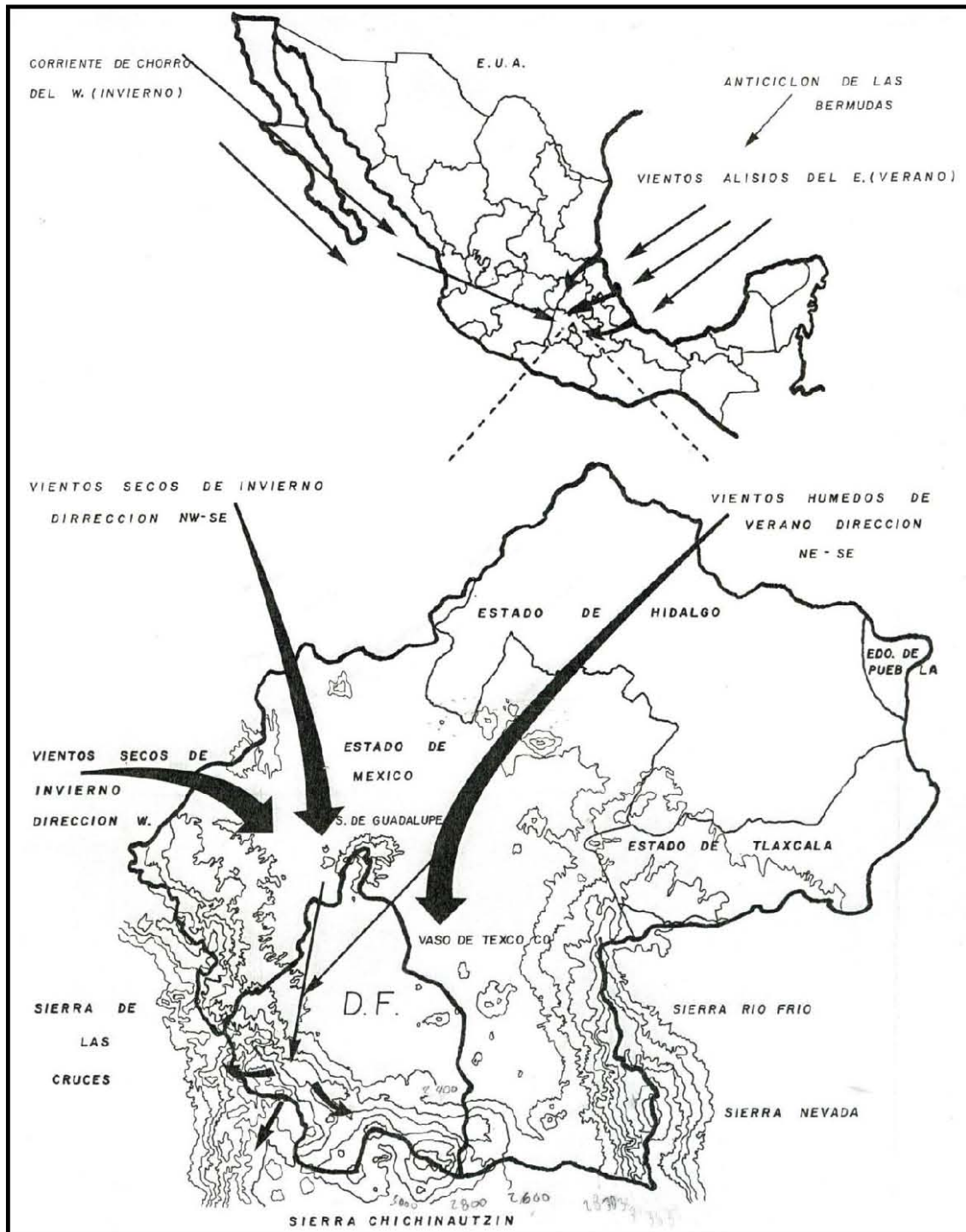


Ilustración 1. Vientos dominantes de la Cuenca de México. Tomado de Corona & Calva, 1987.



4. JUSTIFICACIÓN



Para México existen pocos estudios que determinen el depósito atmosférico ácido utilizando corteza de coníferas como superficie de contacto (Calva *et al.*, 2006 y Rocha, 2014), este tipo de bosques representa una importante fuente de oxígeno, captación de agua, sumideros de carbono y retención de contaminantes. De éstos bosques, el de *Abies religiosa* se ha convertido en uno de los más emblemáticos en la Cuenca del Valle de México; por ello, el presente estudio se realizó con la finalidad de cuantificar y comparar el depósito atmosférico ácido y metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) durante el periodo húmedo y seco, en los parajes Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico donde este tipo de ecosistema forestal tiene presencia.



5. OBJETIVOS

5.1 General

Comparar la acidez atmosférica y metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) utilizando corteza de *Abies religiosa* [(H.B.K.) Schl et Cham.] como superficie de contacto en los parajes Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl, Edo. Méx. y El Cedral, Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

5.2 Específicos

- I. Cuantificar y comparar la acidez atmosférica durante el periodo húmedo y seco utilizando corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico.
- II. Determinar la Capacidad Media Amortiguadora (β) para el bosque de *Abies religiosa* de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.
- III. Cuantificar y comparar los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn durante el periodo húmedo y seco utilizando corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico.



6. HIPÓTESIS

11

Como resultado de la dirección de vientos (Figura 1), los contaminantes ácidos y metales pesados (Cd, Cu, Pb y Zn) derivados de actividades antropogénicas y naturales llegarán a los bosques de *Abies religiosa* de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico; la corteza arbórea de dicha conífera captará los contaminantes en forma de depósito ácido húmedo y seco.

¿El valor de acidez obtenido a través de la corteza de *Abies religiosa* será menor al reportado en el agua de lluvia (5.6)?

¿Los metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn se encontrarán en concentraciones por arriba a lo establecido como normal en plantas?

¿Se registrará variación entre el periodo húmedo y seco en el aporte acidez y metales pesados Cd, Cu, Pb y Zn?



7. MARCO TEÓRICO

7.1 Depósito atmosférico húmedo y seco: Definición

El depósito atmosférico es el proceso mediante el cual las partículas y los gases presentes en el aire se incorporan a la superficie terrestre. Estos gases y partículas pueden provenir de fuentes naturales como incendios forestales, emisiones volcánicas y sal marina, o bien proceder de actividades urbanas, agricultura, emisiones de plantas de generación de energía, vehículos con motor y otras actividades humanas.

El depósito atmosférico (Figura 2) puede ser húmedo o seco; el depósito húmedo es la fracción conformada por lluvia, rocío, granizo y nieve. El depósito seco es la fracción de partículas de materia sólida que a través de procesos como la sedimentación, el impacto y la adsorción llegan a la superficie del suelo.

Cuando el depósito húmedo es ácido se conoce como precipitación ácida o comúnmente llamada lluvia ácida (NADP, 1999 en SMA, 2009).

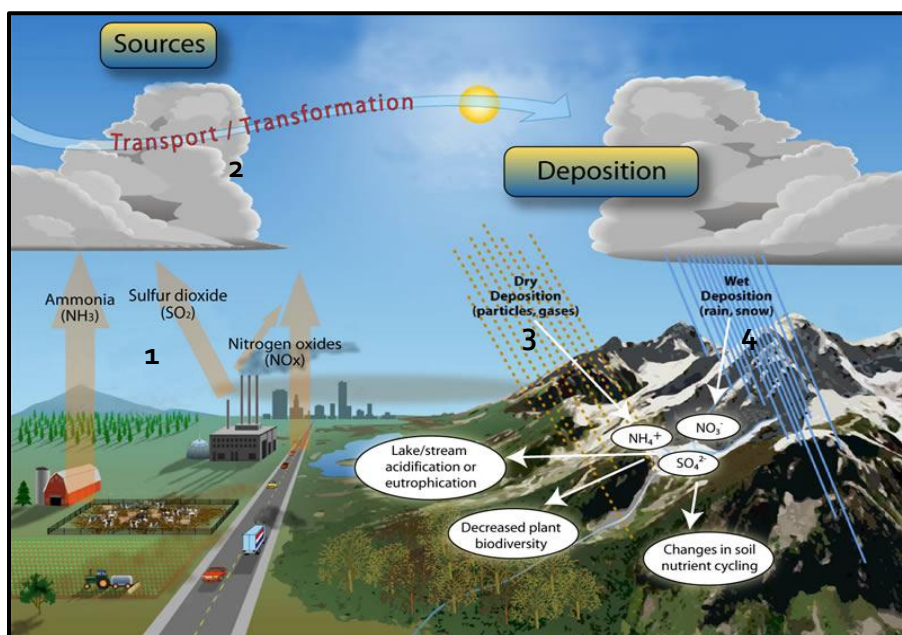


Figura 2. Depósito atmosférico. 1) Los contaminantes primarios son lanzados a la atmósfera, 2) Allí llevan a cabo procesos de transporte y transformación (contaminantes secundarios), 3) Finalmente descienden como depósito atmosférico seco y, 4) Depósito atmosférico húmedo. Tomada de https://www.blendspace.com/lessons/GoBiQ_Ob_ZfQng/acid-deposition.



7.2 Historia de la lluvia ácida

El término lluvia ácida fue utilizado por primera vez por Robert Angus Smith, quien investigaba la química del aire de las industrias británicas en 1850. Los molinos de algodón y las poderosas industrias pesadas que funcionaban gracias al carbón, vertían grandes cantidades de humo a la atmósfera. Smith demostró que estas fábricas hacían emisiones directas de hollín y sustancias que cambiaban la química de la lluvia haciéndola más ácida. A finales de 1950 fueron detectados los resultados de esta contaminación proveniente de las industrias por el incremento que presentó en la atmósfera, haciéndose evidente el efecto en los bosques cercanos a la región (Granados *et al.*, 2010).

El estudio de los compuestos de azufre suele limitarse al gas dominante, el bióxido de azufre (SO_2), que es el más perjudicial para las plantas. Las principales fuentes emisoras son la quema de combustibles fósiles, la descomposición e incineración de materia orgánica, volcanes y aerosoles marinos. El SO_2 se oxida fácilmente en la atmósfera y se convierte en SO_3 , un gas muy reactivo que al reaccionar con el agua origina ácido sulfúrico (H_2SO_4), uno de los principales responsables de la lluvia ácida, fenómeno que ha causado importantes daños en las masas forestales. (Newman, 1995 en Granados *et al.*, 2010).

7.3 Causas de la acidificación

Dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono (O_3) son los contaminantes primarios que originan lluvia ácida. Estos contaminantes provenientes de actividades humanas como la quema de carbón y petróleo en varios procesos industriales (Cullis & Hischler, 1980 en Singh & Agrawal, 2008), fundición de hierro y otros metales (Zn y Cu) y manufactura de ácidos sulfúricos interactúan con los reactantes presentes en la atmósfera dando como resultado depósito ácido.



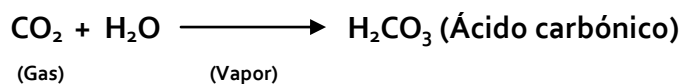
Fuentes naturales de contaminantes de azufre son además provenientes de océanos y, en mucho menos medida de las erupciones volcánicas y combustión de la materia orgánica.



Los niveles de NO_x son más pequeños en comparación con los de SO_2 , pero su contribución en la producción de lluvia ácida es creciente. La mayor fuente natural de NO_x son relámpagos, erupciones volcánicas y procesos biológicos (especialmente actividad microbiana). Mientras que el hombre ha contribuido con fuentes como centrales eléctricas, escapes de vehículos y emisiones industriales (Singh & Agrawal, 2008).

Las rutas de NO_2 y NO_3 en la atmósfera urbana están a merced de la radiación solar e infrarroja que aumenta la energía cinética de ambas moléculas, cuando las concentraciones de estas se igualan, ambas forman un compuesto N_2O_5 (pentaóxido de dinitrógeno) el cual fácilmente reacciona con vapor de agua formando ácido nítrico (Pitts & Pitts, 2000).

El grado de acidez es medido mediante el valor de pH. El cual de manera normal en la lluvia es ácido, la razón se debe a la reacción entre el agua y el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera dando como producto ácido carbónico (Singh & Agrawal, 2008).



Una pequeña cantidad de ácido nítrico es también responsable de la acidez de la lluvia, la cual es producida por la oxidación del nitrógeno en presencia de agua durante tormentas eléctricas (Singh & Agrawal, 2008).



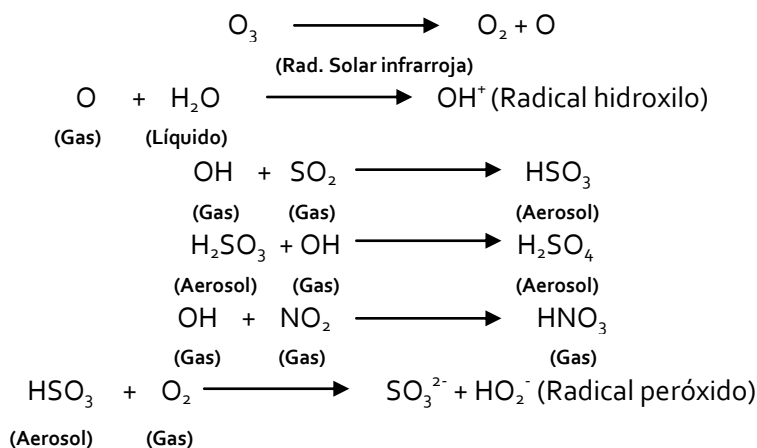
Cuando la lluvia presenta una concentración de iones hidronio H^+ mayor a $2.5 \mu\text{eq}^{-1}$ y un pH con valor menor a 5.6 es considerado ácido (Evans, 1984 en Singh & Agrawal, 2008). Galloway et al., 1982 (en Singh & Agrawal, 2008) propone que un pH de 5.0 es el límite de una contribución natural.



7.4 Reacciones químicas durante la formación de la lluvia ácida

Las reacciones químicas que resultan en la formación de lluvia ácida envuelven la interacción del SO_2 , NO_x y O_3 . Cuando los contaminantes son emitidos a la atmósfera por altas chimeneas, moléculas de SO_2 y NO_x suben y prevalecen en los vientos, donde interactúan en presencia de luz solar con vapor de agua para formar ácido sulfúrico y ácido nítrico. Estos ácidos permanecen en estado de vapor bajo condiciones prevalecientes de altas temperaturas. Cuando la temperatura cae, ocurre el fenómeno de condensación formando gotitas de aerosol, las cuales debido a la presencia de partículas de carbón (sin quemar) se convertirán en ácidos carbonosos en la naturaleza. Este patrón es llamado "tizón ácido". La presencia de agentes oxidantes y las características de la reacción afectan la velocidad de generación del ácido (Calvert *et al.*, 1985 en Singh & Agrawal, 2008).

Reacciones acidas que involucran O_3 :



Los radicales peróxido reaccionan con formaldehído y acetaldehído para formar ácido fórmico y ácido acético respectivamente, contribuyendo del 5-20% de la acidez total en la lluvia (Singh & Agrawal, 2008).

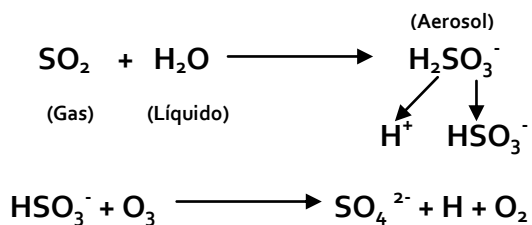
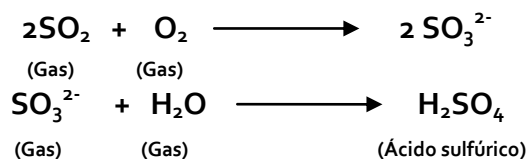


Reacciones acidas que involucran S:

El carbón es especialmente rico en azufre. Cuando el carbón es quemado este componente consigue oxidarse. La oxidación del azufre a SO_2 ocurre directamente en la flama (Singh & Agrawal, 2008).

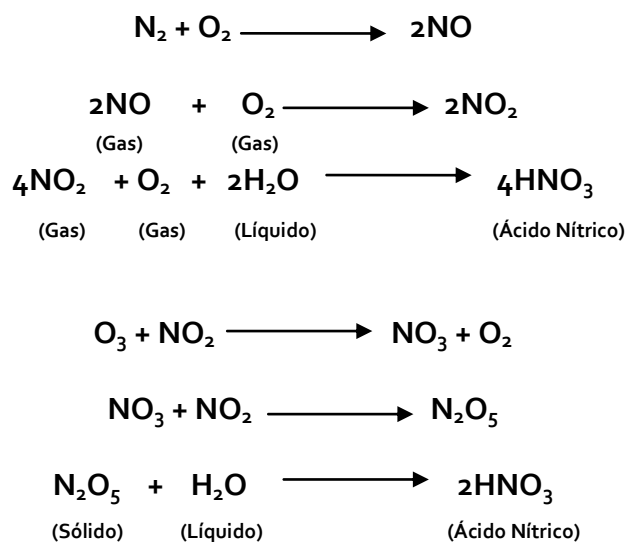


En la atmósfera el SO_2 es arrastrado a lo largo del viento predominante oxidándose lentamente a temperatura ordinaria a SO_3^{2-} (Singh & Agrawal, 2008).



Los oxidantes juegan un papel importante en la atmósfera en la conversión de SO_3^{2-} a SO_4^{2-} (Singh & Agrawal, 2008).

Reacciones acidas que involucran N:



El deterioro de la calidad del aire en el Valle de México no solamente afecta al área urbana, sino también a las áreas forestales aledañas, ya sea de forma directa por las fuentes de contaminación, o bien de forma indirecta mediante la lluvia ácida; esta última, causando daños irreparables, no sólo a la vegetación, sino a todo el ecosistema, generando la pérdida de grandes extensiones de bosque (SEMARNAT, 2012).

La calidad del aire del Valle de México durante el año 2011, registró una concentración de contaminantes: dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y dióxido de azufre, de 11%, 15% y 4%, respectivamente. En el caso de ozono se registró un incremento de 2.5 ppb en el promedio anual, mientras que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ aumentaron en $5 \mu g/m_3$ y $3 \mu g/m_3$, respectivamente. Los contaminantes primarios mantienen tendencia histórica descendente, mientras que en el caso de ozono y partículas la tendencia no presenta cambios (SMA, 2012).

En el Valle de México, el tránsito vehicular se mantiene como la fuente más importante de emisiones de contaminantes en la ciudad, fenómeno asociado con el comportamiento de los contaminantes en el aire. Durante el día las mayores concentraciones de contaminantes primarios se presentaron entre las 6:00 y 12:00 horas, mientras que en el caso del ozono, producto de las reacciones fotoquímicas entre los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno, las mayores concentraciones se registran entre las 12:00 y las 18:00 horas. El análisis por mes permite observar que durante el invierno, el aumento en la frecuencia de las inversiones térmicas de superficie provoca que los niveles de contaminantes primarios sean mayores, mientras que durante los meses de marzo a mayo la ausencia de nubosidad, la intensa radiación solar y la estabilidad atmosférica provocan un aumento considerable en la concentración de ozono y partículas secundarias (SMA, 2012).



7.6 Efectos de la lluvia ácida en los bosques

Los problemas de contaminación atmosférica han alcanzado la escala internacional. Todos los bosques del mundo experimentan algún grado de exposición a contaminación del aire, ya que los procesos de transporte atmosférico no reconocen bordes geográficos.

La polución atmosférica no sólo tiene un efecto directo negativo sobre la vegetación por depósito de los contaminantes sobre la parte aérea de las plantas (afecta la cubierta cerosa de las hojas, dañando la habilidad de los árboles para intercambiar agua y gases con la atmósfera) y pérdida de nutrientes por lavado e intercambio iónico, sino indirectos, los cuales incluyen la acidificación del suelo con la consiguiente liberación de aluminio y otros metales pesados.

Otro aspecto preocupante es la reducción del crecimiento, particularmente del eje del árbol y ramas primarias, la decoloración del follaje con la consecuente defoliación y la pérdida de estructuras reproductivas, todos ellos son síntomas externos y generalizados de árboles sensibles a la polución, cuyo debilitamiento propicia el ataque de insectos y hongos, que suelen acabar con la vida del árbol afectado (Lendzian & Unsworth, 1983, en Pardos, 2006).

7.7 *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham

Abies religiosa (H.B.K.) Schl et Cham (Figura 3) es una especie monoica (Madrigal, 1967). Sus órganos sexuales aparecen junto a las yemas vegetativas durante el mes de diciembre, alcanzando su madurez en marzo y abril, meses en los que se lleva a cabo la polinización; por su parte, las yemas vegetativas continúan su desarrollo hasta agosto y septiembre. Los individuos de esta especie llegan a su madurez sexual entre los 21-25 años, alcanzando una altura de 13-25 m, teniendo una producción de semilla cada dos años aproximadamente.

Su distribución natural en nuestro país abarca los estados de Hidalgo, Puebla, Michoacán, Jalisco, Morelos, Tlaxcala, Guerrero, México, D.F. y Veracruz en un rango altitudinal que va desde los



2 100 a los 3 600 msnm, en ambientes cuya temperatura media anual oscila entre 7 y 15 °C, con una precipitación media anual de 1 000 mm y suelo volcánico de tipo andesitas, basaltos y riolitas (Martínez, 1963).

El oyamel tiene una madera de textura mediana de vetado suave, incolora, insípida; la madera de la albura es amarilla con tinte café claro diferenciándose del duramen que es de color rojizo (Ortega, 1962).



Figura 3. *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham.

7.8 Corteza arbórea

La corteza es un elemento importante en el crecimiento de los árboles. La corteza externa protege al árbol del mundo exterior (clima), mantiene la humedad durante periodos secos y protege de enfermedades e insectos.

La corteza interna o floema actúa como una tubería por donde los productos de la fotosíntesis generados en las hojas son llevados al resto del árbol. Esta sección de células vive por un corto tiempo antes de pasar a ser parte de la corteza externa.



Entre la corteza y la madera existe una capa celular conocida como cambium. El cambium representa la parte creciente del tronco. Esta capa de celular produce corteza de un lado y madera del otro lado. Las hormonas conocidas como auxinas son transportadas por el floema al cambium. Las auxinas causan que el cambium anualmente produzca nueva corteza de un lado y nueva madera del otro. Se produce de ocho a 10 veces más madera que corteza anualmente (CES, 1997).

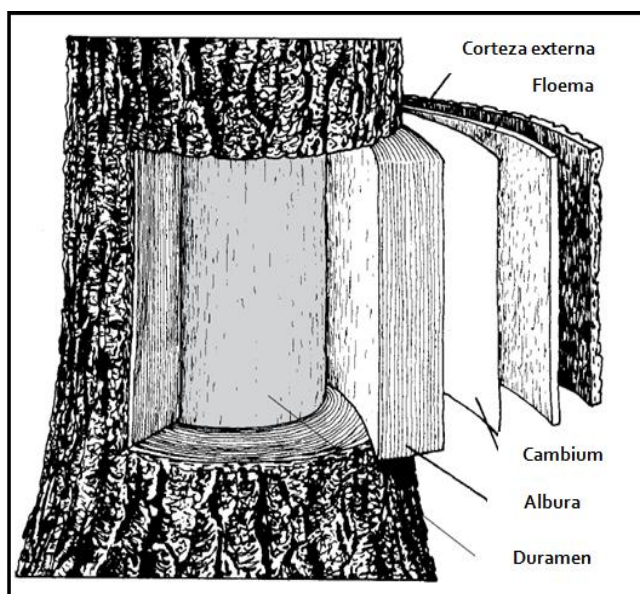


Figura 4. Partes del tronco. Tomada de CES, 1997

7.9 Corteza como biomonitor de depósito atmosférico y metales pesados

La corteza de los árboles se encuentra en continua exposición al ambiente, por lo tanto, puede proporcionar información precisa sobre los cambios que se producen en el aire de los ecosistemas forestales (Santamaría & Martín, 1997).

La corteza de árboles caducifolios es por naturaleza menos ácida, por tanto es considerada un indicador con mayor sensibilidad de contaminación atmosférica que la corteza de algunas coníferas como los pinos (Santamaría & Martín, 1997). Sin embargo, autores como Grodzinska (1977) han encontrado una correlación apreciable entre la acidez de la corteza de pino y la concentración de SO_2 en la atmósfera.



Por otro lado, investigadores como Lötschert & Köhm (1977) han encontrado en extractos de corteza, que la medición de la conductividad eléctrica es un sensible bioindicador de contaminación ambiental especialmente de SO_2 .

Las ventajas del uso de corteza como biomonitor de contaminación atmosférica y metales pesados, radica en su estructura anatómica (porosidad), ya que retiene contaminantes a largo plazo (cationes y aniones) y en ser un recurso ampliamente disponible sin afectar la salud del árbol (Berlizov et al., 2007).

7.10 Propiedades de los metales pesados

Los elementos de la tabla periódica se encuentran divididos en metales (izquierda) y no metales (derecha). La mayoría de los elementos que limitan con esta línea divisoria son metaloides o semi-metales. Los metales son sustancias con características de brillo, buenos conductores de calor y electricidad; con excepción del mercurio, todos los metales son sólidos a temperatura ambiente. Son maleables (formación de láminas) y dúctiles (formación de alambres). La mayoría posee propiedades de dureza con excepción de los alcalinos, que son muy suaves (Volke et al., 2005, en Marín, 2008).

Se considera metal pesado al elemento metálico que tiene una densidad igual o superior a 6g/cm^3 cuando está en forma elemental, o cuyo número atómico es superior a 20. Su presencia en la corteza terrestre es inferior al 0.1% y casi siempre menor al 0.01%. Junto a estos metales pesados hay otros elementos químicos: Arsénico, Boro, Bario y Selenio que se suelen englobar en ellos por presentar orígenes y comportamientos asociados (Kabata & Pendias, 1992, en Marín, 2008).

El Cadmio (**Cd**) es un elemento natural de la corteza terrestre. Generalmente se encuentra como mineral combinado con otros elementos tales como oxígeno (óxido de cadmio), cloro (cloruro de cadmio) o azufre (sulfato de cadmio, sulfuro de cadmio).



El cadmio entra al suelo, al agua y al aire durante actividades industriales, de minería, combustión de carbón y desechos domésticos. Es un metal que no se degrada en el ambiente, pero sí cambia de forma. Las partículas de cadmio en el aire pueden movilizarse largas distancias antes de depositarse en el suelo o agua. Algunas formas de cadmio se disuelven en agua y otras se adhieren fuertemente a partículas del suelo. Las plantas, los peces y otros animales incorporan cadmio del ambiente.

El Cobre (**Cu**) es un elemento esencial que se encuentra de manera natural en el ambiente; es liberado desde fuentes naturales como volcanes, vegetación en descomposición e incendios forestales. De manera antropogénica es liberado a través de la industria minera, actividades agrícolas, actividades de manufactura y por la liberación de aguas residuales a ríos y lagos.

El cobre liberado al ambiente generalmente se adhiere a partículas de materia orgánica, arcilla, o arena, no se degrada en el medio ambiente, pero sus compuestos si, de esta manera puede ser liberado al aire o agua.

El Plomo (**Pb**) es un metal gris-azulado que se encuentra naturalmente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. La mayor parte de éste metal proviene de actividades como la minería, manufactura industrial y quema de combustibles fósiles; por lo que se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente.

El plomo no se degrada, pero sus compuestos son transformados por la luz natural, el aire y el agua. Cuando se libera plomo al aire, puede movilizarse largas distancias antes de depositarse en el suelo; una vez que cae, generalmente se adhiere a partículas del suelo. La movilización del plomo desde el suelo al agua subterránea dependerá del tipo de compuesto y de las características del suelo.

El Zinc (**Zn**) es uno de los elementos más comunes en la corteza terrestre. Se encuentra en el aire, el suelo y el agua, y está presente en todos los alimentos. El zinc puro es un metal brillante



blanco-azulado. Cierta cantidad de zinc es liberada al ambiente por procesos naturales, pero la mayor parte proviene de actividades humanas tales como la minería, producción de acero, combustión de petróleo e incineración de basura.

El zinc se adhiere al suelo, sedimentos y a partículas de polvo en el aire. Dependiendo del tipo de suelo, algunos compuestos de zinc pueden movilizarse al agua subterránea, lagos, arroyos y ríos; la mayor parte del zinc en el suelo permanece adherido a partículas de suelo y no se disuelve en agua. La lluvia y la nieve remueven las partículas de polvo con zinc del aire (ATSDR, 2007).

Cuadro 1. Propiedades de los metales: Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Modificado de Reimann & Caritat, 1998 (En Marín, 2008).

Elemento	Cd	Cu	Pb	Zn
Propiedades				
Número atómico	48	29	82	30
Masa atómica	112.41	63.55	20.72	65.39
Estados de oxidación	2+	2+, 1+	2+, 4+	2+
Electronegatividad (Pauling)	1.69	1.9	2.33	1.65
Densidad (g/cm³)	8.65	8.96	11.35	7.13

7.11 Efectos tóxicos específicos de los metales pesados en diferentes especies vegetales

Cadmio. Reducción del crecimiento, inhibición de la fotosíntesis y la transpiración, inhibición de las enzimas en el ciclo de Calvin, inhibición de la síntesis de clorofila, alteración en la concentración de Mn, Ca y K.

Cobre. Reducción del crecimiento, alteración de la permeabilidad de la membrana, desbalance iónico, inhibición de la fotosíntesis y de la respiración, interferencia en la síntesis de pigmentos y lípidos.



Plomo. Inhibición del crecimiento, alteración de la concentración de Ca y K, inhibición de la mitosis, inhibición en los procesos de la fotosíntesis, respiración y absorción de agua.

Zinc. Inhibición en el transporte de electrones durante la fotosíntesis, alteraciones en la concentración de Cu, Fe, Ca y Mn, y modificación de la permeabilidad de membranas (Cervantes & Moreno, 1999 en Marín, 2008).



8. ÁREAS DE ESTUDIO

8.1 Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl

8.1.1 Localización

El Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl (Figura 5) se encuentra en la parte centro-oriental del Eje Volcánico Transversal, ocupando una parte sustancial de la Sierra Nevada. Se localiza entre las siguientes coordenadas extremas $18^{\circ}59'00.43''$ y $19^{\circ}28'09.44''$ de Latitud Norte y $98^{\circ}34'55.88''$ y $98^{\circ}46'40.95''$ de Longitud Oeste. Abarca una superficie de 39,819.086 hectáreas dividida entre el Estado de México, con 28 307.487112 ha (71.09%); Puebla con 11 072.918088 ha (27.81%); y Morelos con 438.6808 ha (1.10%). Sus geoformas (sierra, conos volcánicos y laderas) son de origen volcánico, predominando rocas basálticas y andesíticas. Su rango altitudinal va de los 3000 a los 5,480 msnm (CONANP, 2012).

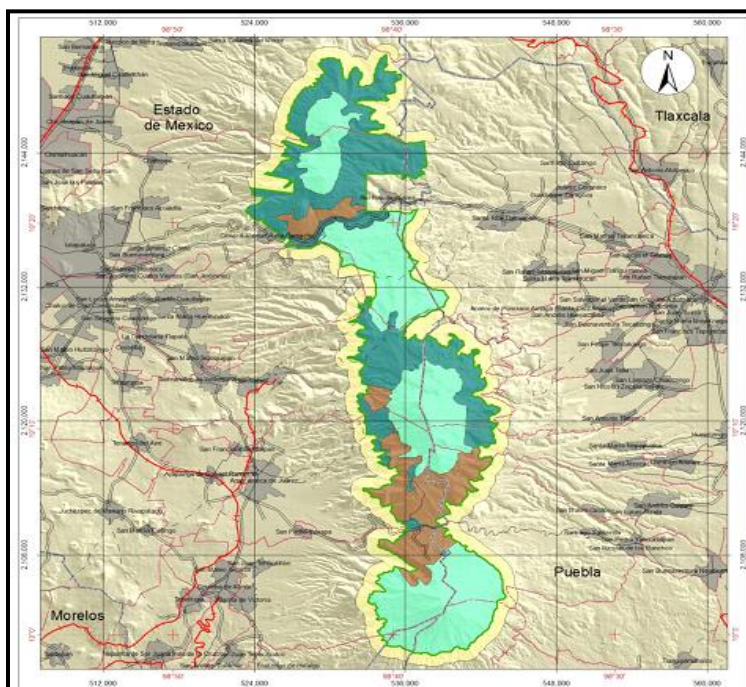


Figura 5. Localización del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl. Tomada de DOF, 2013.



El clima es templado subhúmedo con régimen de lluvias de verano, su temperatura media anual es de 13.2°C. El mes más frío es enero con temperatura de 10.9°C y el más cálido es abril con 15.4°C. La precipitación anual es de 1 092 mm, donde febrero es el mes más seco con 8.6 mm y julio el más lluvioso con 228.8 mm. El porcentaje de lluvia invernal es de 3.57%. Por sus condiciones de temperatura se considera templado con verano fresco largo.

Esta región se ve afectada en la época fría del año por sistemas de tiempo propios de las latitudes medias, como los frentes fríos y la invasión de masas de aire polar continental; en el verano influyen los sistemas meteorológicos propios de la zona tropical como los huracanes y las ondas tropicales. Debido a su topografía y ubicación, el parque tiene una variedad de climas que van del templado húmedo a los climas frío y muy frío; la temperatura disminuye con la altura a razón de 0.68 °C por cada 100 m (CONANP, 2012).

Por su latitud el parque se ubica en la región de los vientos alisios, en una zona donde predominan las circulaciones de tipo convectivo local, lo cual hace posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año (CONANP, 2012). Los vientos dominantes son de norte a sur en el invierno y durante los meses de agosto a septiembre, los cuales varían de oeste a este de marzo a julio, así como también en octubre y noviembre (Noyola & Méndez, 2012).

8.2 Parque Nacional El Chico

8.2.1 Localización

El Parque Nacional El Chico (Figura 6) geográficamente se ubica entre las coordenadas extremas de los 20°10'10" a 20°13'25" latitud norte y los 98°41'50" a 98°46'02" de longitud oeste, su extensión territorial es de 2 739-02-63 ha; posición enclavada en el sector centro suroriente de la República Mexicana, que corresponde al extremo occidental del sistema orográfico Sierra de



Pachuca, incluido en la porción austral del Eje Neovolcánico Transversal. De acuerdo a la FAO el parque exhibe las siguientes unidades edáficas: Andosol húmico - Cambisol húmico; Cambisol húmico - Andosol ócrico - Litosol; Feozem háplico - Cambisol húmico; Cambisol húmico - Regosol eútrico; Andosol vítrico – Cambisol húmico, y Feozem háplico (CONANP, 2005).

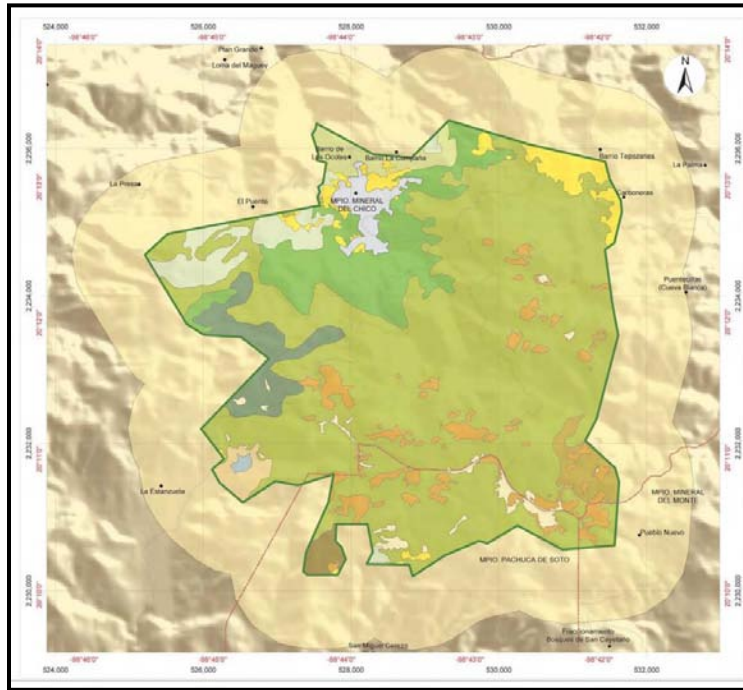


Figura 6. Localización del Parque Nacional El Chico. Tomada de CONANP, 2005.

8.2.2 *Clima*

De acuerdo con Melo & López (1993) en el parque predomina un clima cuyas características son: templado subhúmedo con verano fresco y largo; temperatura media anual entre 12 y 18°C; temperatura media del mes más frío entre -3 y 18°C, y la del mes más caliente superior a 26.5°C. En el año, el régimen pluviométrico se manifiesta a través de aproximadamente 130 días con lluvia apreciable y 27 con lluvia inapreciable, lo cual genera una lámina anual de 1 479.5 mm. La neblina es un fenómeno común en el parque, presentándose



hasta 20 días por mes, durante la época húmeda, y en forma intermitente en el restante periodo anual (CONANP, 2005).

Los vientos dominantes en la mayor parte del Parque Nacional provienen del sureste, aunque en la época seca son frecuentes también los que soplan del noroeste. Durante casi todo el año está sujeto a la acción de vientos moderadamente fuertes por la tarde a tal grado que llegan a derribar árboles (CONANP, 2005).

8.2.3 Vegetación

El área del Parque Nacional El Chico, de acuerdo a Rzedowsky (1986), pertenece a la Provincia Florística de las Serranías Meridionales de la Región Mesoamericana de Montaña, correspondiente esta última al Reino Holártico. Dicha provincia se distingue por incluir las elevaciones más altas del país y por la predominancia de los bosques de oyamel (siendo este el más abundante), pino y encino (CONANP, 2005).

La flora de la Sierra de Pachuca es rica y diversa, debido a las características ambientales tan variadas que presenta. La presencia de 6 de los 9 géneros de coníferas existentes en México son prueba de ello (Medina & Rzedowsky, 1981 en CONANP, 2005). Las diferencias en altitud que van de los 2 320 msnm en la porción norte hasta los 3 090 msnm en la porción sur, así como rasgos fisiográficos particulares, permiten una alta cantidad de hábitats disponibles para la vida silvestre (CONANP, 2005).

8.2.3.1 Bosque de Oyamel

Este tipo de vegetación ocupa la mayor superficie dentro del parque nacional. Su amplia cobertura tipifica a la vegetación del parque, con 1 725.4 ha que equivalen el 62.9 % respecto al



área; se distribuye desde los 2 600 a los 3 086 msnm e indistintamente se establece en cualquier rango de inclinación, exposición de laderas, humedad edáfica, profundidad del suelo, etc. Sobresale por la forma cónica de sus árboles y sus alturas de 20 a 40 m, constituyendo una cubierta densa y siempre verde (CONANP, 2005).



9. MATERIAL Y MÉTODO

9.1 Corteza de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham

La corteza de oyamel (Figura 7) es grisácea, áspera, agrietada y dividida en placas irregulares.



Figura 7. Corteza de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl et Cham

9.2 Fase de campo

El trabajo se llevó a cabo durante los meses Septiembre – Octubre 2012 (periodo húmedo) y Marzo – Abril 2013 (periodo seco) en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés (Figura 8) del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl, Edo. Méx. (3 200 msnm) y El Cedral del Parque Nacional El Chico (Figura 9), Hidalgo (3 376 msnm) las cuales son porciones del bosque de oyamel, cuyas coordenadas son 19°14'0"N, 98°43'5"O y 20°10'55"N, 98°42'32"O respectivamente.





Figura 8. Localización del Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.



Figura 9. Localización del paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico.

Dentro de estos sitios se seleccionaron treinta árboles de la especie *Abies religiosa* por el método del vecino más cercano, las características que los organismos cumplieron son un diámetro mayor a 50 cm, sin daño físico y sin parásitos en el fuste con base a lo establecido por Stanxäng (1969) y Grodzinka (1977).

Posterior a ello se procedió a tomar el diámetro normal y diámetro basal de cada árbol, con la finalidad que todos los organismos tuvieran edades similares y con ello unificar el muestreo.



Ulteriormente se recolectaron tres muestras de corteza de cada árbol (a la altura del pecho) con ayuda de un formón y con profundidad de 3 mm; tomando la primera muestra de la cara incidente a los vientos provenientes de la fuente contaminante en cada periodo de muestreo, de acuerdo con lo señalado por Stanxäng (1969) y Calva (2006).



Figura 10. Colecta de corteza de *Abies religiosa*.

Cada muestra fue debidamente etiquetada y envasada, para su posterior análisis en laboratorio.



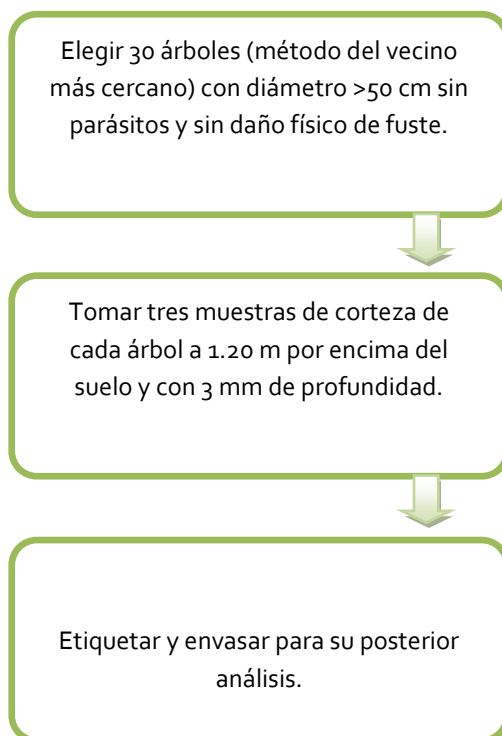


Figura 11. Método colecta de corteza.

9.3 Fase de laboratorio

9.3.1 Método para la determinación de acidez

Se realizó la limpieza de corteza de forma manual con un cepillo dental para eliminar polvo y material orgánico que pudiese contener (liquen y musgo), después se dejó secar en estufa a 90° C por espacio de 48 h para evitar su hidratación, posteriormente se molió (en un molino para café, el cual fue limpiado perfectamente cada que se introdujo una nueva muestra, evitando así la contaminación de las ya mencionadas).

De cada una de las 3 muestras de corteza molida por árbol se pesaron 2g colocándose en frascos de alta dureza (polipropileno) de acuerdo con Calva *et al.*, 2006 hidratándose con agua desionizada en relación 1:2 peso – volumen, se dejaron refrigerar por 48 h y posteriormente se realizó la cuantificación de pH (Potenciómetro Conductronic pH Modelo 20 ± 0.01) y



Conductividad Eléctrica (λ) (Conductímetro pH Modelo 10 $\pm$ 1.5%) con base al método establecido por Grodzinska (1977).



Posterior a este procedimiento se tomaron dos muestras al azar por árbol (en total 10 muestras por paraje- periodo): a la primera se le agrego 1 mL de NaOH 0.1 N y a la segunda 10mL de HCl 0.1 N; se agitaron por 40 minutos y ulteriormente fue cuantificado el pH para determinar la capacidad media amortiguadora (β). Una vez que se obtuvieron los resultados la capacidad media amortiguadora fue determinada mediante la siguiente fórmula de acuerdo con Johnsen & SØchting (1973):

$$\beta_{\text{mean}} = \frac{0.001}{\Delta\text{pH}}$$

Donde:

ΔpH = pH inicial – pH final

Los datos obtenidos de estos procedimientos fueron llevados a una base de datos para su posterior análisis.



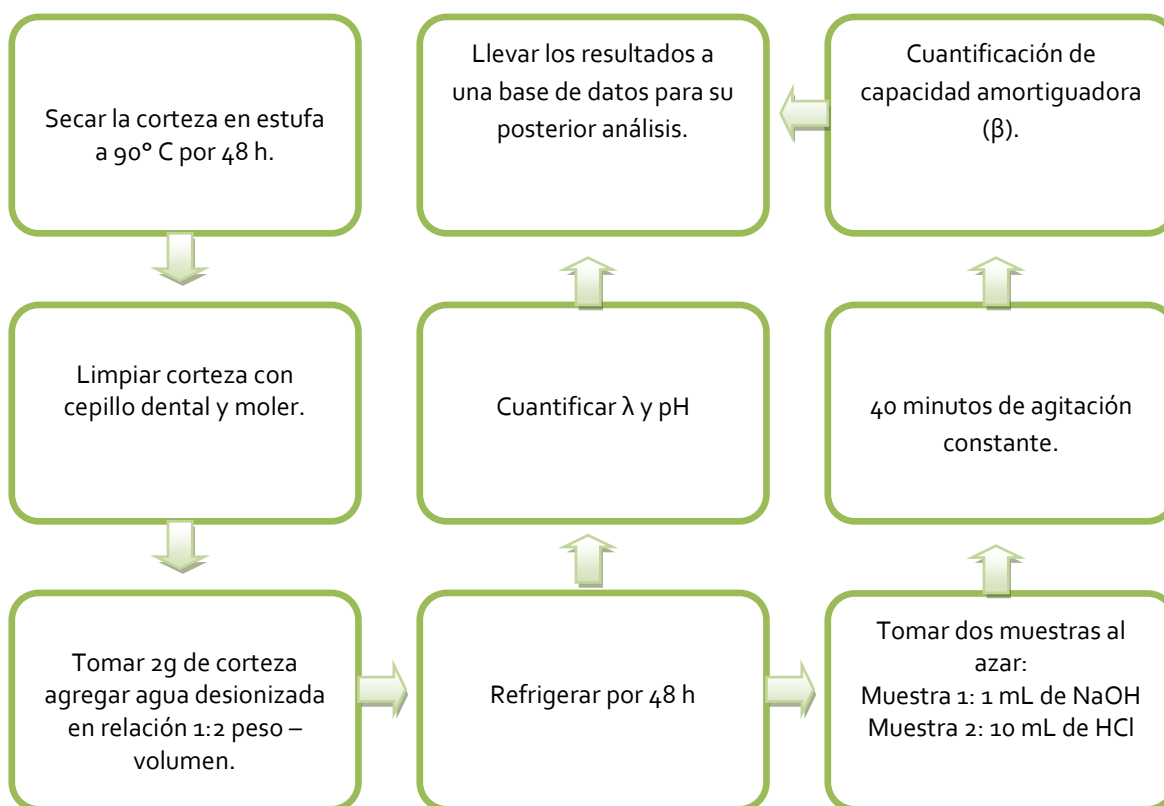


Figura 12. Método para la determinación de acidez.

9.3.2 Método para la determinación de metales pesados

Para la cuantificación de metales pesados se tomaron 0.50 g de corteza los cuales fueron transferidos a un matraz Kjendahl de 100 mL al que se añadió 1 mL de HClO_4 (60%), 5 mL de HNO_3 (Conc.) y 0.5 mL de H_2SO_4 (Conc.). Enseguida se agitó suavemente y se procedió a digerir lentamente a calor moderado, incrementando posteriormente. Después de la aparición de humos blancos, se continuó la digestión por espacio de quince minutos a veinte minutos (aproximadamente). Luego de este tiempo la digestión se dejó enfriar (Modificado de Allen et al., 1974). Posteriormente, las muestras digeridas se filtraron y aforaron a 50 mL.



Los metales pesados cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) se determinaron en un lote de quince muestras elegidas al azar por periodo húmedo y seco (60 en total), mediante EAA de flama Modelo SPECTRAA 200 Marca VARIAN.

Nota:

- La digestión de blancos se lleva a cabo del mismo modo omitiendo la muestra.
- Es recomendable realizar para muestras altas en proteínas, grasa o sustancias resinosas una predigestión con HNO_3 antes de agregar el HClO_4 .

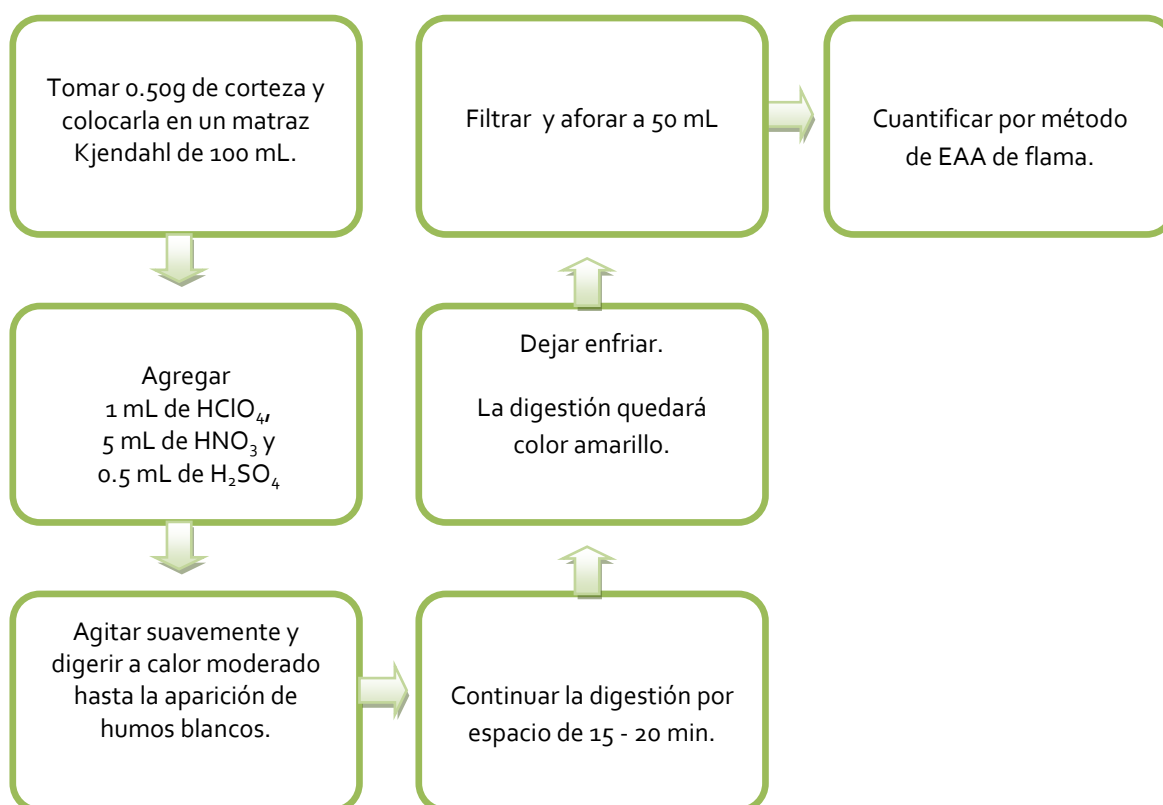


Figura 13. Método para la cuantificación de metales pesados.

9.4 Análisis estadístico

Con los resultados obtenidos de la fase de laboratorio se creó una base de datos; a través del programa OriginPro 8 se realizó el comparativo de los resultados por sitio de estudio y



periodo; para confirmar lo establecido se desarrolló una comparación múltiple de medias, estableciendo el método de diferencia mínima significativa (LSD *Least Significant Difference*) y fijando un intervalo de confianza del 95%, con el propósito de determinar diferencias significativas entre los sitios de estudio y periodos de colecta, ésta prueba se ejecutó con el programa StatGraphics Plus 5.0



10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



10.1 *Km 16.5 carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl*

El paraje es una ladera irregular de exposición noroeste, la pendiente aproximada es de 32°, presenta ligera erosión, algunos signos de incendios y actividades antropogénicas. La vegetación estaba representada en un 35% por estrato arbóreo, 25% estrato arbustivo y 40% estrato herbáceo. El estrato arbóreo presentaba signos de daño como despunte y algunos tocones coetáneos.



Figura 14. Sitio de muestreo Km 16.5 carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.

10.2 *Paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico, Hidalgo*

El sitio es una ladera irregular de exposición noroeste, con pendiente aproximada de 38°, sin erosión ni incendios, pero con signos de actividades antropogénicas. La vegetación estaba representada en un 30% por estrato arbóreo, 20% estrato arbustivo y 50% estrato herbáceo. El



estrato arbóreo presentaba signos de daño como despunte, raíces expuestas y algunos tocones no coetáneos.



Figura 15. Sitio de muestreo paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico, Hidalgo.

10.3 Potencial de Hidrógeno (pH)

Un total de 360 muestras de corteza de *Abies religiosa* fueron colectadas en los parajes Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés (CPC), Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico por periodo (90 en húmedo y 90 en seco). El cuadro 2 muestra los valores registrados para potencial de hidrógeno (pH).

Al comparar el promedio de acidez del presente estudio con el reportado en pináceas europeas, canadienses y estadounidenses (Cuadro 3), se observa que la corteza de las pináceas presenta un intervalo no mayor a las 3.8 unidades; en el caso del oyamel la variación se encuentra entre 2.8 y 5 unidades (± 0.01); por lo tanto, la diferencia de acidez entre las pináceas y *Abies religiosa* es de 1.2 unidades (± 0.01).



Mientras que, la diferencia promedio entre la acidez registrada para el Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés respecto a El Cedral se encuentra en 0.08 unidades (± 0.05).

Cuadro 2. Valores máximos, mínimos y promedio registrados de potencial de hidrógeno (pH) en corteza de *Abies religiosa* por periodo en el Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico

Paraje	Periodo	pH mín (± 0.01)	pH máx (± 0.01)	Promedio (± 0.01)
Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés	Húmedo	2.29	7.29	3.73
El Cedral		2.5	5.54	3.65
Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés	Seco	3.38	6.21	4.16
El Cedral		3.23	6.48	4.07

Cuadro 3. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de Pináceas (Calva et. al., 2006)

Lugar	pH máx.	pH mín.
Europa	2.2	6.0
Canadá	3.7	4.0
EUA	3.2	6.2

Calva et al., 2006 refieren un potencial de hidrógeno promedio de 4.35 en muestras de corteza de oyamel del Parque Nacional El Chico durante los años 1995 – 1996, al realizar la comparación con el pH promedio del presente estudio, se observa que a lo largo de éste tiempo la acidez ha aumentado en 0.49 unidades en este ecosistema boscoso. Durante los mismos años, para el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl el grupo de investigadores registró un promedio de pH de 4.1; el actual estudio registra un promedio de 3.94, por lo tanto la acidez en este Parque Nacional para *Abies religiosa* ha aumentado en 0.16 unidades.

La diferencia de acidez en ambos parques nacionales, se infiere son a causa del aumento en la quema de combustibles fósiles, producto del crecimiento poblacional en ambas entidades; de 1990 a la fecha el Estado de México aumento su población en 5.3 millones de habitantes e Hidalgo en 0.7 millones de habitantes (INEGI, 2012); aunado a ello, el crecimiento de la actividad industrial



para sustento de la población y procesos naturales como incendios forestales y exhalaciones volcánicas provocan el incremento en la acidez atmosférica de estas zonas.

López (2010) cuantificó la variación del potencial de hidrógeno en agua de lluvia, de un claro del bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico; así como también en el follaje, fuste y hojarasca de 4 árboles de los sitios mencionados (Cuadro 4). El agua de lluvia que cae sobre la vegetación se enriquece en materia orgánica y elementos minerales; los productos excretados por las hojas son, en efecto, arrastrados por el agua, junto con parte importante de la microflora, así como el polvo atmosférico depositado previamente sobre las hojas; esta agua atraviesa el dosel arbóreo y es denominado *troughfall* (lavado de copa). Turkey (1970 en Santa *et al.*, 1989) ha estudiado el mecanismo de este fenómeno de secreción cuticular, el cual depende de la edad de las hojas, las especies vegetales y de las variedades.

Por otra parte el agua que fluye por las ramas y troncos denominado *stemflow* (lavado fustal) le confiere ciertas características importantes al tronco del árbol (Slatyer, 1962 en Santa *et al.*, 1989). De esta manera, se explica el porqué de las diferencias encontradas entre el potencial de hidrógeno en la zona del claro, follaje, tronco y hojarasca de López (2010), respecto al pH encontrado en la corteza de *Abies religiosa* del presente estudio; la lluvia representa la fuente de agua principal en los ecosistemas terrestres, aunque en bosques una fracción significativa se elimina rápidamente por evaporación en la misma cubierta vegetal (lo que se denomina intercepción); en ecosistemas forestales, esta pérdida se acompaña de una repartición espacial resultante de dos vías de penetración a través de la cubierta vegetal de un bosque denso: una está representada por el *troughfall* y otra por el *stemflow* (Santa *et al.*, 1989).



Cuadro 4. Variación del potencial de hidrógeno del agua de lluvia en el bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl y El Chico (López, 2010)

Sitio de colecta	pH Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl (± 0.4)	pH Parque Nacional El Chico (± 0.4)
Claro del bosque	4.51	5.69
Follaje	3.72	5.44
Fuste	3.96	6.07
Hojarasca	5.58	6.68

Patiño (2011), cuantifico semanalmente el potencial de hidrógeno del agua de lluvia ($\bar{x}=4.7$) y depósito seco ($\bar{x}=6.0$), en la zona de Chamusquina del Parque Nacional El Chico. Al contraponer los resultados de la Chamusquina con los del Cedral, la disimilitud promedio en el periodo húmedo es de 1.05 unidades, mientras que para el periodo seco es de 1.93 unidades; la diferencia entre los aportes de acidez en estas zonas se infiere se deben a las distancias respecto a las fuentes contaminantes (Ciudad de Pachuca, zona minera e industrial en la región de Tula) y a factores ya mencionados como el *troughfall* y *stemflow*.

Por otro lado, Rocha (2014) obtuvo un pH promedio de 3.75 en muestras de corteza de *Pinus spp* colectadas en Paso de Cortés durante el periodo húmedo (septiembre – octubre 2012), mientras que para el periodo seco (marzo – abril 2013) registró un promedio de 4.03; con base en lo anterior, se infiere que *Abies religiosa* es más sensible a captación de depósito atmosférico ácido en el periodo húmedo, no así durante el periodo seco donde *Pinus spp* exhibe mayor susceptibilidad dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatépetl.

La figura 16 muestra el potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 CPC durante el periodo húmedo y seco, se toma referencia de la literatura (Martin & Gray, 1971) para el registro del pH normal (sin contaminación) que exhibe la corteza de pino (4.5 – 5.5).



El periodo que muestra mayor aporte de acidez corresponde al húmedo. Durante la colecta del periodo húmedo, el volcán Popocatepetl registró exhalaciones de baja a moderada intensidad, acompañadas de vapor de agua, gas y pequeñas cantidades de ceniza; sumado a ello, la localización del Parque Nacional en relación con la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), trae como consecuencia que los vientos que llegan a esta zona contengan contaminantes como azufre, diésel y SO_x emitido por los automotores e industrias (Calva *et al.*, 2006), originando lluvia ácida, la cual daña al ecosistema forestal de *Abies religiosa* y a las especies herbáceas, arbustivas y fauna que habita en el parque.

Durante los meses de lluvia la atmósfera es inestable y favorece la dilución y dispersión de la contaminación. Por otra parte, el incremento en la humedad del ambiente permite la reacción de los contaminantes con el agua removiéndolos de la fase gaseosa, la precipitación actúa como un mecanismo de limpieza en la atmósfera, disminuyendo considerablemente la contaminación del aire (SMA, 2012).

La temporada de lluvias coincide con las vacaciones de verano en las instituciones de educación, provocando una disminución importante en la cantidad de vehículos que circulan, con un impacto favorable en la calidad del aire (SMA, 2012); pero desfavorable para los bosques cercanos a la cuenca, ya que todos los contaminantes son vertidos hacia estos ecosistemas, es por ello que el periodo húmedo registra el mayor aporte de acidez en comparación al periodo seco.

Durante la colecta del periodo seco, el volcán Popocatepetl registro exhalaciones de baja intensidad, acompañadas de emisiones de vapor de agua, gas y pequeñas cantidades de ceniza. El material particulado en el periodo seco al igual que en el húmedo, se infiere proviene de los vientos de la ZMVM cargados de contaminantes (carbón orgánico, carbón elemental, sulfatos, nitratos, etc.), así como también de las exhalaciones del volcán Popocatepetl.



Durante los meses de marzo a abril los días son más largos y soleados, provocando un incremento en la temperatura y en la intensidad de la radiación solar. La región central del país se encuentra bajo la influencia de sistemas de escala ciclónica que favorecen cielos despejados y viento débil en superficie, y a su vez inversiones térmicas de subsidencia a varios kilómetros de altura que provocan condiciones de estabilidad. Cerca de la superficie existe una débil dispersión de la contaminación, la intensa radiación solar favorece la formación del esmog fotoquímico, entre cuyos componentes se encuentran el ozono y los aerosoles orgánicos secundarios (SMA, 2012).

En términos porcentuales para el periodo húmedo el 34.9% de los datos se encuentran dentro del rango normal de acidez (Martin & Gray, 1971) y el 60.2 % en el rango ácido. En el periodo seco el 39.5% de los datos mostraron condiciones normales de acidez y el 56.9% condiciones acidas.

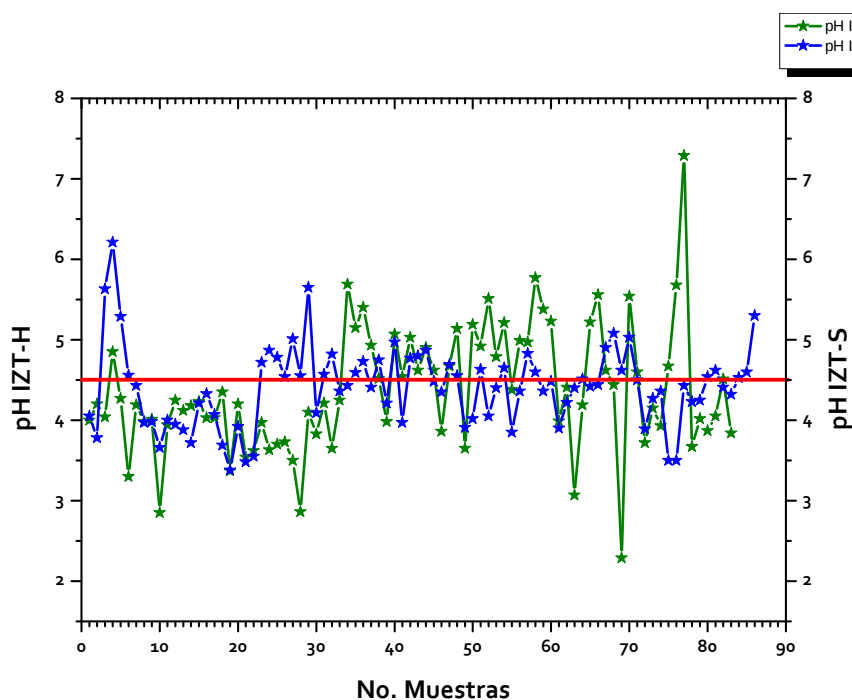


Figura 16. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos periodos



La figura 17 muestra el potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el paraje El Cedral, durante el periodo húmedo y seco. El periodo que muestra mayor aporte de acidez corresponde al húmedo. A los alrededores de este Parque Nacional y en los municipios del Estado de Hidalgo, la explotación de minerales es una de las principales fuentes económicas.

Para el año 2010 la dirección de minas registró 20 títulos que cubren una superficie de 29 402 ha, de los cuales a la explotación metálica de oro, plata, cadmio, cobre, manganeso, plomo y zinc se suma la explotación de productos no metálicos como agregados pétreos, arcillas, arena, azufre, calcita, cantera, caolín, grava, tepetate, tezontle y yeso (SGM, 2011). Aunado a ello, la producción de concretos por parte de las cementeras ubicadas en Atotonilco de Tula (102 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico), Huichapan (143 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico) y Tula de Allende (112 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico); así como también la refinería localizada en éste último municipio, hace creciente la contaminación directa de partículas.

Cabrera *et al.*, 2003 determinó que el 90% de las emisiones de origen industrial en Tula de Allende, son derivadas de la industria química y petroquímica. Además de lo anterior, refiere a esta región como una de las fuentes estacionarias que emiten grandes cantidades de contaminación, principalmente de precursores de lluvia ácida. La contaminación de este tipo de fuentes afecta a toda la región y no solo al municipio donde se emite.

Los municipios que más aportan emisiones al aire de origen móvil, por automotores impulsados a gasolina, fueron: Pachuca de Soto, Tulancingo de Bravo, Tula de Allende, Tizayuca y Actopan. Con respecto a los automotores impulsados por diesel, el municipio de Tulancingo de Bravo aporta la mayor cantidad de emisiones atmosféricas, seguido por Atitalaquia, Tizayuca, Pachuca de Soto y Mineral de la Reforma (Cabrera *et al.*, 2003).



En términos porcentuales para el periodo húmedo el 4.6% de los datos se encuentra dentro del rango normal de acidez (Martin & Gray, 1971) y el 95.3 % en el rango ácido. En el periodo seco el 20.9% de los datos mostraron condiciones normales de acidez y el 74.4% condiciones acidas.

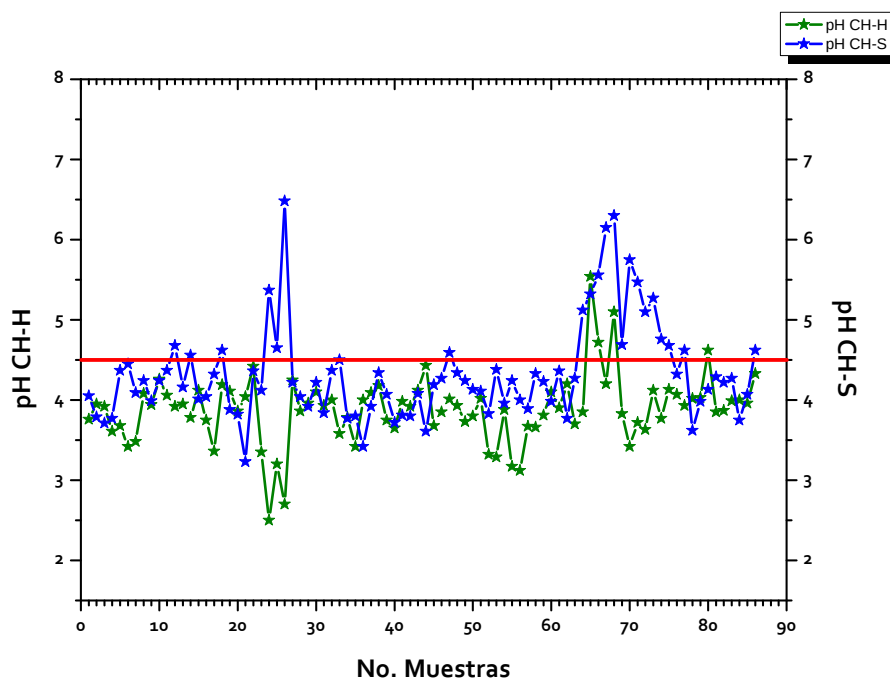


Figura 17. Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos periodos

La figura 18 muestra la comparación entre los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo húmedo, se observa que El Cedral presenta mayor aporte de acidez respecto al Km 16.5 CPC. Se infiere que los valores ácidos mostrados por la corteza de *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico son producto de los contaminantes lanzados a la atmósfera por parte de los automotores y las minas ubicadas a los alrededores de éste ecosistema boscoso, así como también de la refinería y las cementeras. De acuerdo con CONANP (2005) la neblina es un fenómeno común en éste Parque Nacional, las gotas de vapor de agua al combinarse con las



partículas contaminantes ácidas dan origen al fenómeno de lluvia ácida, afectando de manera considerable a la masa forestal.

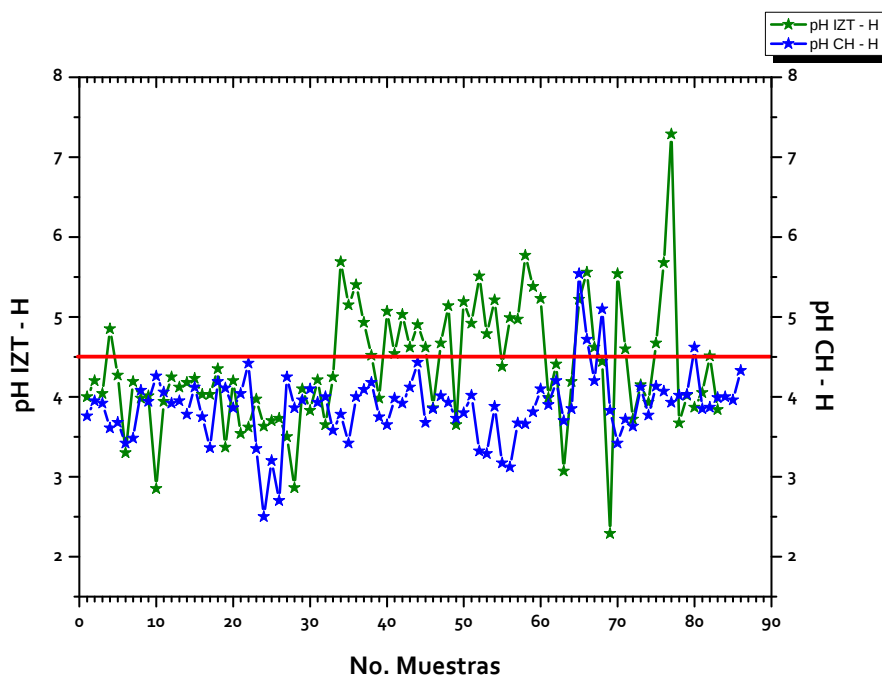


Figura 18. Comparación de Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H). La línea roja representa el promedio de pH para ambos parajes

La figura 19 muestra la comparación de los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo seco. Se observa que el paraje del Parque Nacional El Chico presenta mayor aporte de acidez durante éste periodo respecto al paraje del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl. Al igual que para el periodo húmedo, se argumenta que dichos valores son a causa de las fuentes contaminantes cercanas al Cedral (industria minera, cementera, petroquímica y fuentes móviles), respecto a las fuentes contaminantes en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés (fuentes móviles y volcán Popocatepetl).



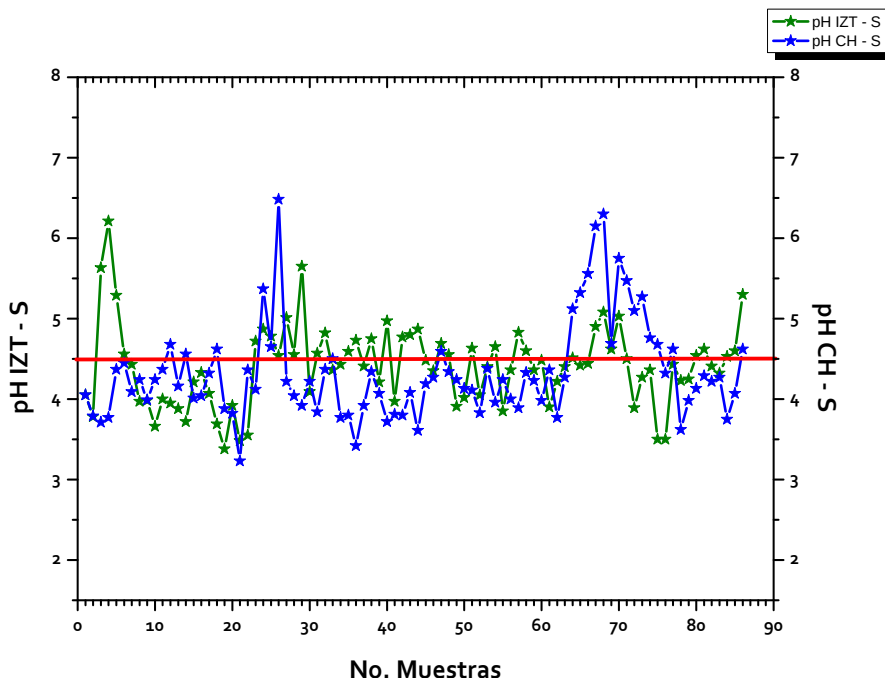


Figura 19. Comparación de Potencial de hidrógeno (pH) registrado en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo seco (S). La línea roja representa el promedio de pH para ambos parajes

Finalmente, se infiere que la diferencia altitudinal entre El Cedral (3 376 msnm) y el Km 16.5 CPC (3 200 msnm) podría ser otra causa de disimilitud en el aporte de acidez; ya que a mayor cota altitudinal mayor exposición de vientos contaminantes.

La figura 20 muestra la comparación de medias para las variables pH y protones H^+ registrados en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco. Al analizar la conducta del pH (Figura 19A) y su equivalente en protones H^+ (Figura 19B) se observa lo siguiente:

- I. Existe diferencia mínima significativa de la variable pH entre el periodo seco y húmedo del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.



- II. No existe diferencia mínima significativa de la variable pH entre el periodo húmedo y seco del Parque Nacional El Chico.
- III. Existe diferencia mínima significativa de la variable pH para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.
- IV. No existe diferencia mínima significativa de la variable pH para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.
- V. Existe diferencia mínima significativa de la variable protones H^+ para el periodo húmedo entre el Parque Nacional El Chico e Iztaccíhuatl - Popocatepetl.
- VI. Existe diferencia mínima significativa de la variable protones H^+ para el periodo seco entre el Parque Nacional El Chico e Iztaccíhuatl - Popocatepetl.
- VII. No existe diferencia mínima significativa de la variable protones H^+ entre el periodo húmedo y seco del Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl.
- VIII. No existe diferencia mínima significativa de la variable protones H^+ entre el periodo húmedo y seco del Parque Nacional El Chico.

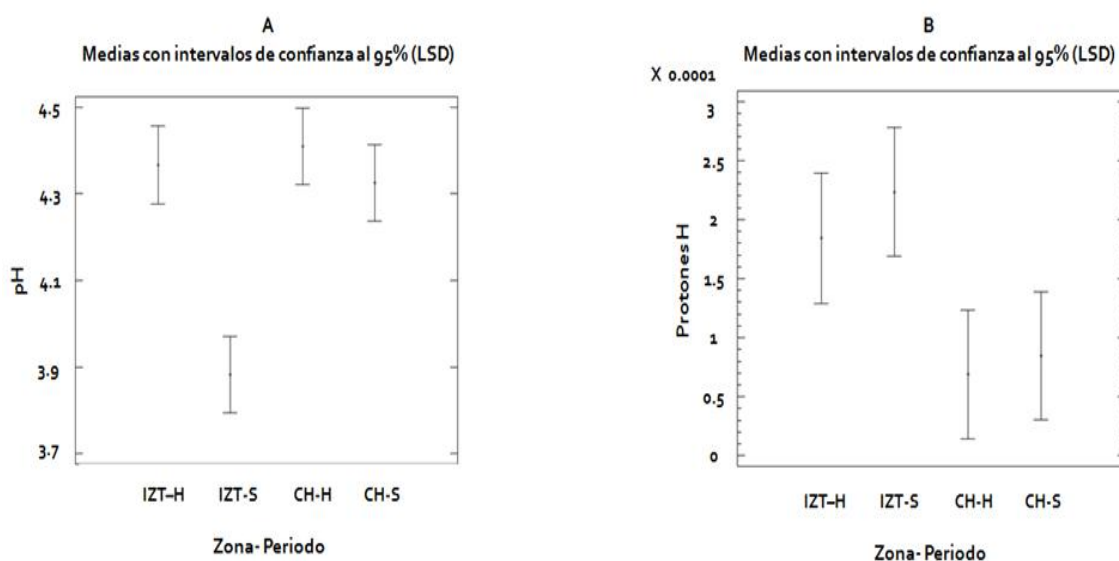


Figura 20. Comparación de medias de potencial de hidrógeno (pH) y protones H^+ registrados en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)



De acuerdo con lo anterior, la variable pH no refleja de manera puntual la diferencia mínima significativa que existe entre los Parques Nacionales y los periodos de colecta; es por ello que, se realizó la conversión a protones H^+ con la finalidad de notar el valor real de su concentración en solución de corteza de *Abies religiosa*.

La acidez o alcalinidad de una solución están determinadas por la concentración de H^+ . En la mayor parte de las sustancias naturales comunes, estas concentraciones son muy bajas y expresarlas en forma decimal resulta complicado; es por ello que en 1909 el danés Sören Peter Sørensen propuso una alternativa para expresar la concentración de H^+ : la escala pH, basada en la transformación logarítmica de la concentración molar de protones en solución (Henri & Heinke, 1999). El cuadro 5 muestra los valores de la concentración de H^+ en escala pH a partir de los intervalos de confianza mostrados en la figura 19B; nótese que todos los intervalos de confianza se encuentran por debajo del valor natural de pH del agua de lluvia (5.6).

Cuadro 5. Intervalos de confianza en escala pH a partir de H^+ para el bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco

Parque Nacional - Periodo	Intervalo de confianza al 95% (LSD) (Escala pH)
Iztaccíhuatl Popocatepetl - Húmedo	3.88 - 3.61
El Chico - Húmedo	3.76 - 3.55
Iztaccíhuatl Popocatepetl - Seco	5.00 - 3.92
El Chico - Seco	4.52 - 3.85

10.4 Capacidad amortiguadora (β) de la corteza arbórea

Un amortiguador o buffer es una sustancia en solución que ofrece resistencia a los cambios de pH cuando se agrega a la solución o se forma en ella un material ácido o alcalino (Henri & Heinke, 1999). La capacidad amortiguadora (β) de los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral por periodo se muestran en la figura 21, como punto comparativo se toma la β del agua destilada, que no presenta esa capacidad amortiguadora.



El cuadro 6 muestra la capacidad media amortiguadora (CMA β) de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral. Se observa que CMA β para *Abies religiosa* en el Parque Nacional El Chico es mayor que CMA β del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl en el periodo húmedo; por lo tanto, el ecosistema boscoso de *Abies religiosa* del Parque Nacional El Chico tiene mayor resistencia a los cambios de acidez en la lluvia respecto al Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl; lo anterior resulta muy importante, ya que como se mencionó la acidez medida en el Parque Nacional El Chico es mayor a la del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.

En el periodo seco la CMA β para *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl es mayor que CMA β del Parque Nacional El Chico; por lo tanto, el ecosistema boscoso de *Abies religiosa* para el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl presenta mejor resistencia a los cambios de acidez como producto del depósito de partículas ácidas; sin embargo, de acuerdo a Rocha (2014) quien obtuvo un promedio de CMA β = 0.0028 en muestras de corteza de *Pinus spp* colectadas en Paso de Cortés, se puede argumentar que este último, presenta mejor amortiguamiento a los cambios de acidez respecto a *Abies religiosa* (β = 0.00023) en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.

Cuadro 6. Capacidad media amortiguadora (CMA β) en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo y seco

Paraje	Periodo	Capacidad media amortiguadora CMA β (± 0.01)
Km 16.5 carretera a paso de Cortés	Húmedo	0.00023
El Cedral		0.00052
Km 16.5 carretera a paso de Cortés	Seco	0.00055
El Cedral		0.00024



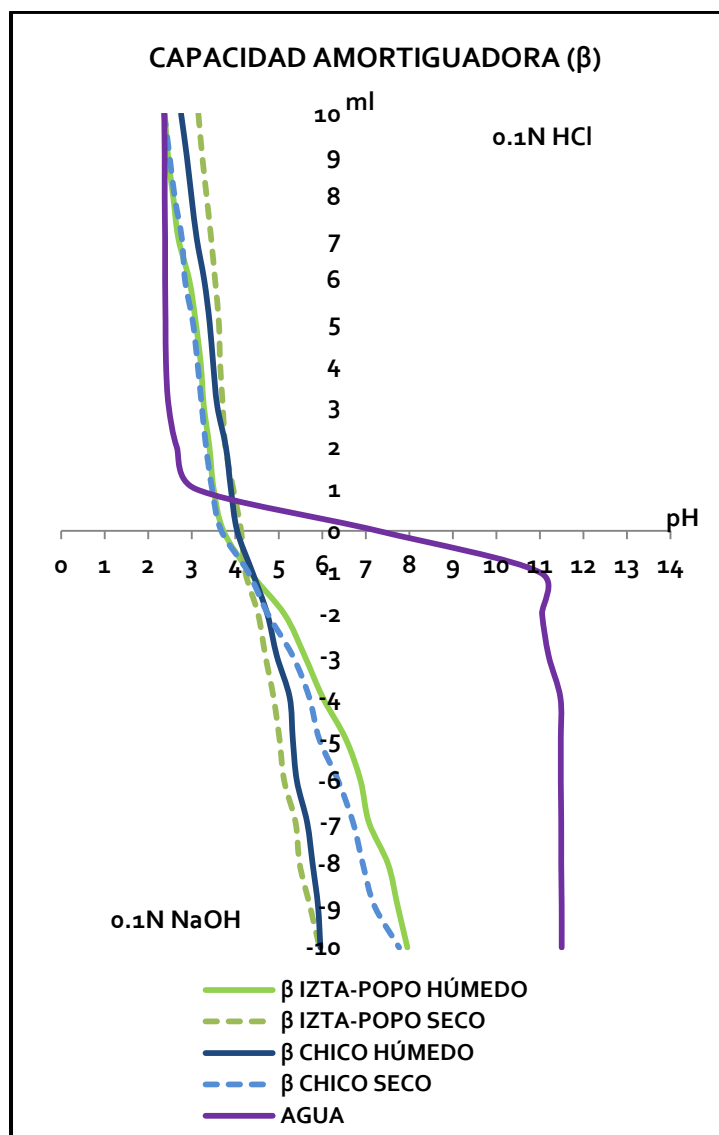


Figura 21. Comparación de la capacidad amortiguadora (β) de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para los periodos húmedo y seco

Al comparar la capacidad amortiguadora del oyamel y la reportada por Stäxang (1969) y Grodzinska (1977) (Figura 22 y 23) para el roble (*Quercus robur* L.) en Suiza y Polonia respectivamente, se observa que la capacidad amortiguadora de *Quercus robur* L. es mayor a la mostrada por *Abies religiosa* en los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatépetl y El Chico, puesto que el punto de inflexión para el roble se encuentra entre las 3.5 a 9 unidades en el caso de



Suiza y 3 a 11 unidades en el caso de Polonia; mientras que para el oyamel se localiza entre 3.5 y 8 unidades (± 0.05).

35

Grodzinska (1977) refiere a la corteza de *Quercus robur* L. con muy alta capacidad de amortiguamiento respecto a *Pinus silvestris* L.

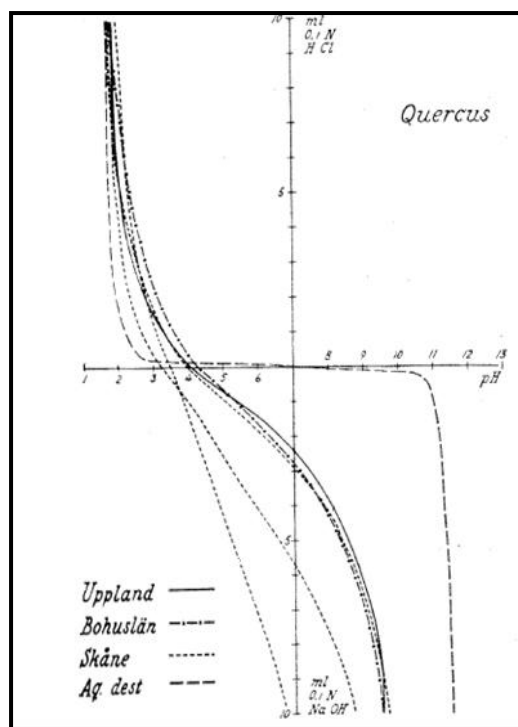


Figura 22. Capacidad amortiguadora (β) de corteza de *Quercus robur* L. (Ståxang, 1969 Oikos 20:2:16)

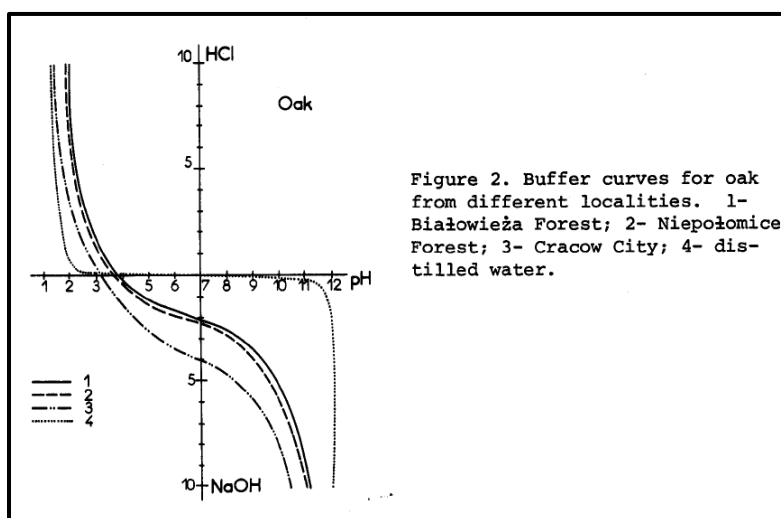


Figura 23. Capacidad amortiguadora (β) de corteza de *Quercus robur* L. (Grodzinska, 1977. Water, Air and Soil Pollution 8:3-7)



10.5 Conductividad eléctrica (λ)

Los registros de conductividad eléctrica (μS) máxima, mínima y promedio en corteza de *Abies religiosa* por periodo de los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral se muestran en el Cuadro 7; se observa que el Km 16.5 CPC exhibe promedios de conductividad eléctrica (417.2 y $346.8 \pm 1.5\%$ μS) más altos que El Cedral (316 y $317.2 \pm 1.5\%$ μS) en ambos periodos de colecta. La diferencia promedio entre ambos Parques nacionales es de $65.4 \mu\text{S} \pm 1.5\%$; sin embargo, cabe señalar que la conductividad del agua desionizada fue de $0.16 \mu\text{S} \pm 1.5\%$.

Rocha (2014) registró la conductividad eléctrica de la corteza de *Pinus spp* en la zona de Paso de Cortés, los resultados para el periodo húmedo son de $255.5 \mu\text{S}$ y para el seco $178.5 \mu\text{S}$; para el presente estudio los promedios de *Abies religiosa* son de $417.2 \mu\text{S}$ para el periodo húmedo y $346.8 \mu\text{S}$ para el periodo seco; con base en lo anterior, se interpreta que *Pinus spp* y *Abies religiosa* en el Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl presentan mayor cantidad de disociación de sales durante el periodo húmedo. Lo anterior, es resultado del gran aporte de protones H^+ producto del lavado atmosférico de contaminantes que el aire lleva hasta este Parque Nacional.

La comparación entre las conductividades eléctricas promedio de *Pinus spp* y *Abies religiosa* muestran que ésta última exhibe valores superiores; por lo tanto, su capacidad como bioindicador es mejor respecto a *Pinus spp*.

Cuadro 7. Valores máximos, mínimos y promedio registrados de conductividad eléctrica (λ) en corteza de *Abies religiosa* por periodo en el Km 16.5 de la Carretera a Paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico

Paraje	Periodo	λ mín (μS) ($\pm 1.5\%$)	λ máx (μS) ($\pm 1.5\%$)	Promedio (μS) ($\pm 1.5\%$)
Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés	Húmedo	190	851	417.2
El Cedral		170	889	316
Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés	Seco	177	1110	346.8
El Cedral		114	962	317.2



La figura 24 muestra la comparación de la conductividad eléctrica en extractos de corteza de oyamel durante los periodos húmedo (H) y seco (S) para el Km 16.5 CPC. La temporada húmeda presenta valores superiores de λ con respecto a la temporada seca, con excepción de un dato en la última mencionada ($> 1100 \pm 1.5$). Se infiere que el azufre que llega a este ecosistema boscoso, es producto de las emanaciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) y óxido de azufre (SO_2) por parte del volcán Popocatepetl (desde el 21 de diciembre de 1994 el volcán registra actividad fluctuante), estos compuestos al reaccionar (oxidación) con vapor de agua producto de la transpiración forman ácido sulfúrico (H_2SO_4) componente importante en la lluvia ácida; aunado a ello, los vientos procedentes de la Zona Metropolitana del Valle de México traen consigo grandes cantidades de óxidos de azufre derivado de la combustión de gasolinas y de la industria. SMA, 2012 refiere que las cantidades de SO_2 en la atmósfera de la Ciudad de México se encuentran dentro del rango establecido por la NOM-023-SSA1-1993; sin embargo, no cumple los estándares dictados por la OMS y US EPA.



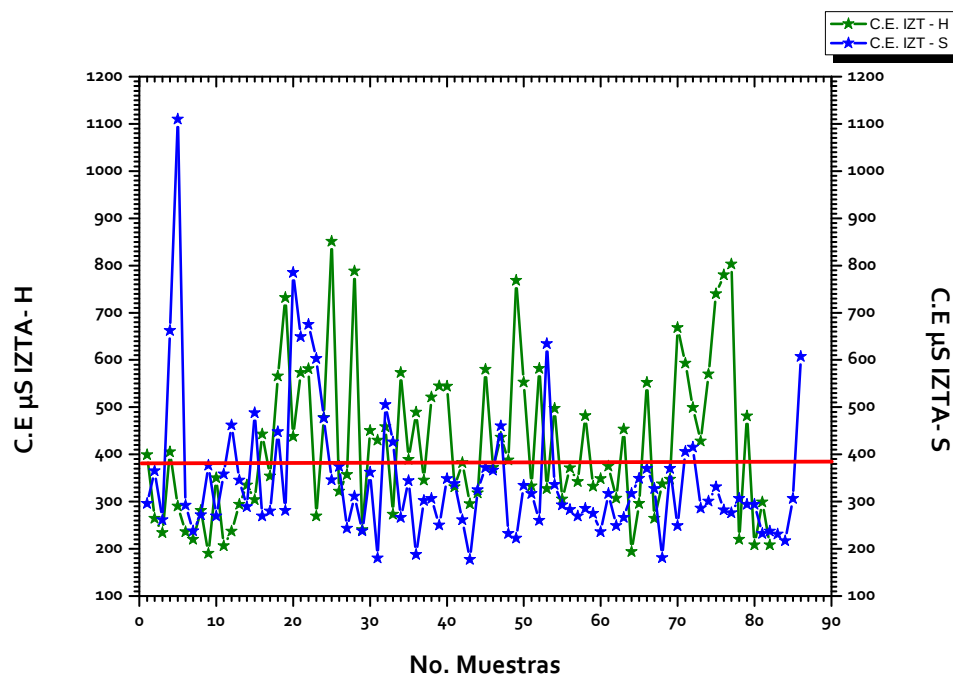


Figura 24. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de λ para ambos periodos

La figura 25 muestra la comparación de la conductividad eléctrica en extractos de corteza de oyamel durante los periodos húmedo (H) y seco (S) en El Cedral. La temporada seca exhibe valores de conductividad eléctrica ($> 950\mu\text{S}$) superiores a los registrados en la temporada húmeda ($< 900\mu\text{S}$). Se infiere que el SO_2 que llega a éste Parque Nacional proviene de las minas cercanas [Metálicas: Región Pachuca-Actopan (Au, Ag, Pb, Zn, Cu); No Metálicas: Región Pachuca-Atotonilco-Actopan (Arcillas, Arena sílica, Cantera, Agregados pétreos)], así como también de los vientos cargados de contaminantes procedentes de la Ciudad de Pachuca de Soto Y Tula de Allende; de acuerdo con INEGI para el año 2010 se tenían registrados 153 390 vehículos motorizados, es decir alrededor de un vehículo por cada dos habitantes.



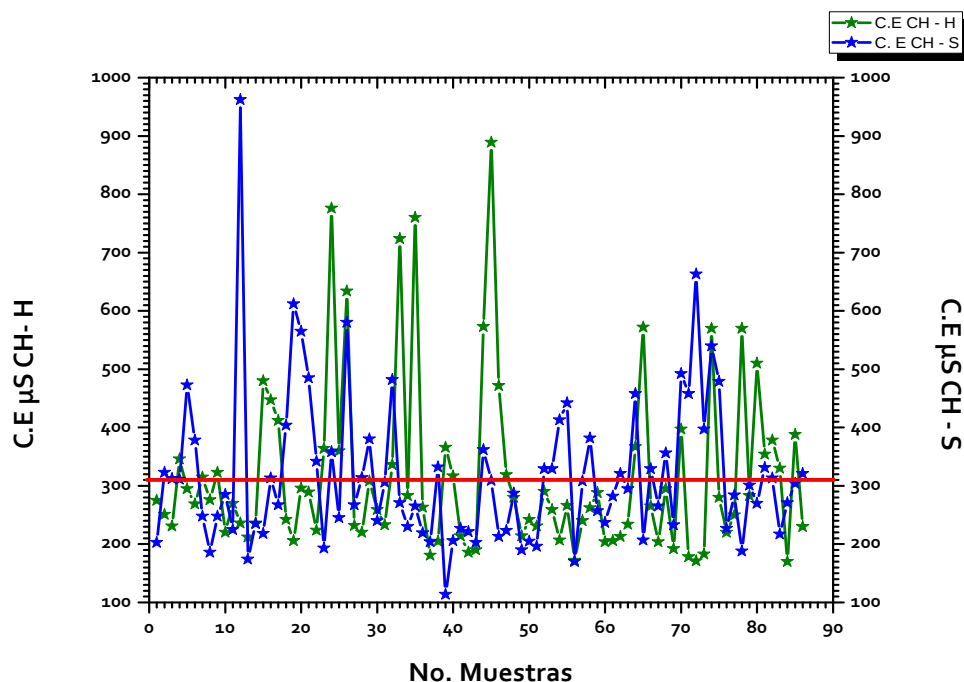


Figura 25. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en el paraje El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H) y seco (S). La línea roja representa el promedio de λ para ambos periodos

Johnsen & SØchting (1973) refieren una relación inversamente proporcional entre el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (λ) medida en extractos de corteza, esta última es además directamente proporcional al SO_2 en la atmósfera. La Figura 26 muestra la comparación de la conductividad eléctrica registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo húmedo.

Con base a lo descrito por Johnsen & SØchting, los resultados mostrados para el Km 16.5 CPC, en el periodo húmedo coinciden con lo afirmado por los investigadores, puesto que este paraje mostro valores de potencial de hidrógeno menores a los registrados para El Cedral, pero mayores en conductividad eléctrica. Por lo tanto, se estima que los niveles de SO_2 en la atmósfera del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl para el periodo húmedo son más altos respecto a los del Parque Nacional El Chico.



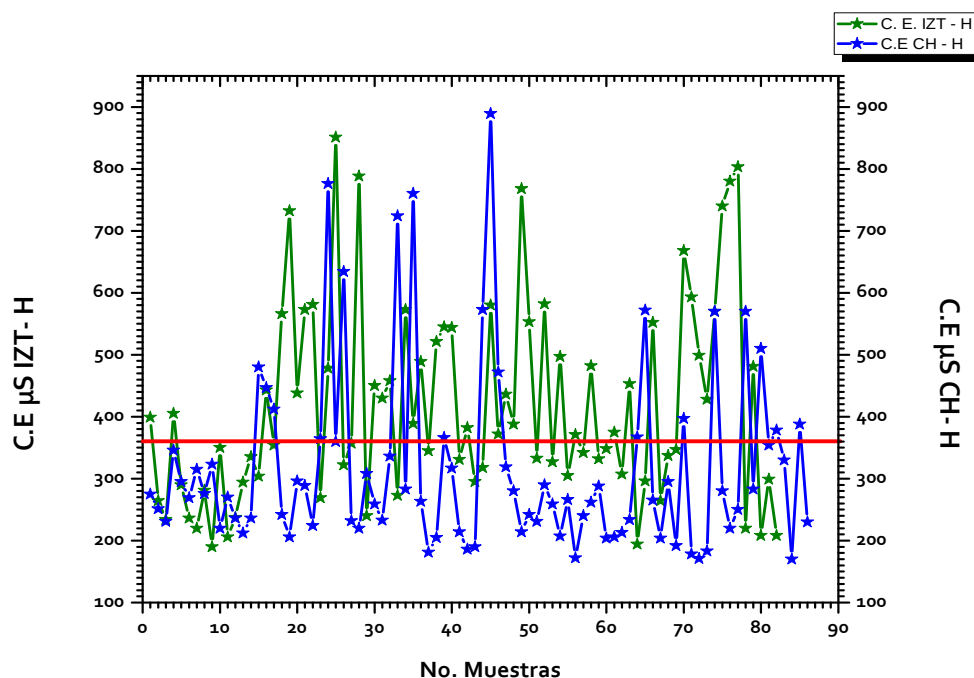


Figura 26. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo húmedo (H). La línea roja representa el promedio de λ para ambos parajes

La figura 27 muestra la comparación de la conductividad eléctrica registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo seco. Los registros de potencial de hidrógeno y conductividad eléctrica confirman la relación inversamente proporcional entre el pH y la conductividad eléctrica descrita en 1973 por Johnsen & SØchting. Por lo tanto se argumenta que los niveles de SO_2 en la atmósfera del Parque Nacional El Chico para el periodo seco son inferiores a los del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatépetl.



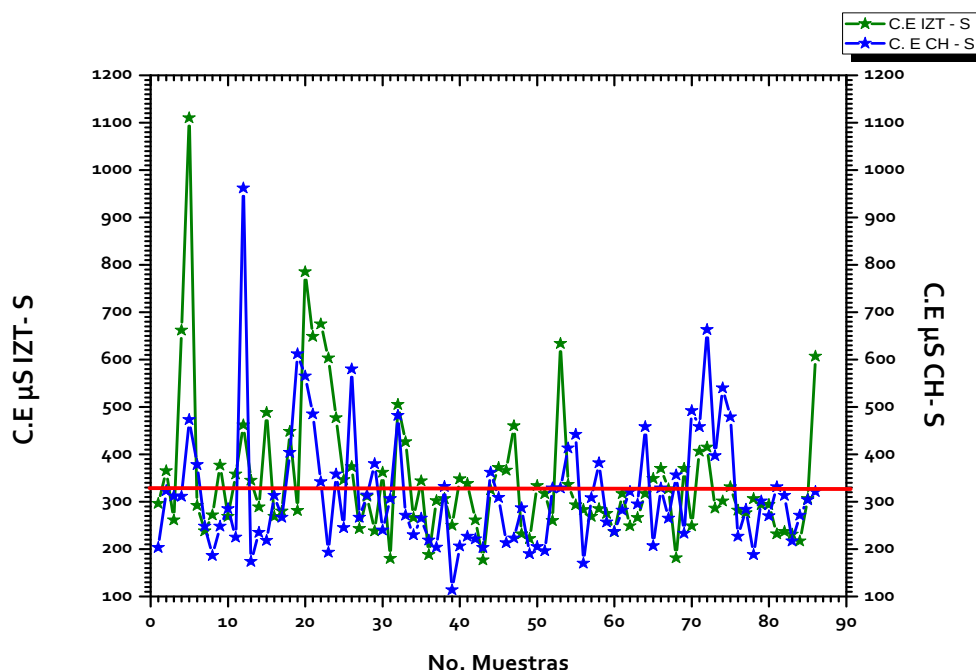


Figura 27. Comparación de la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* en los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico para el periodo seco (S). La línea roja representa el promedio de λ para ambos parajes

La figura 28 muestra la comparación de medias de la variable conductividad eléctrica (μS) registrada en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, de la cual se observa lo siguiente:

- I. Existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
- II. No existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional El Chico.
- III. Existe diferencia mínima significativa para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.



- IV. No existe diferencia mínima significativa para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl y El Chico.

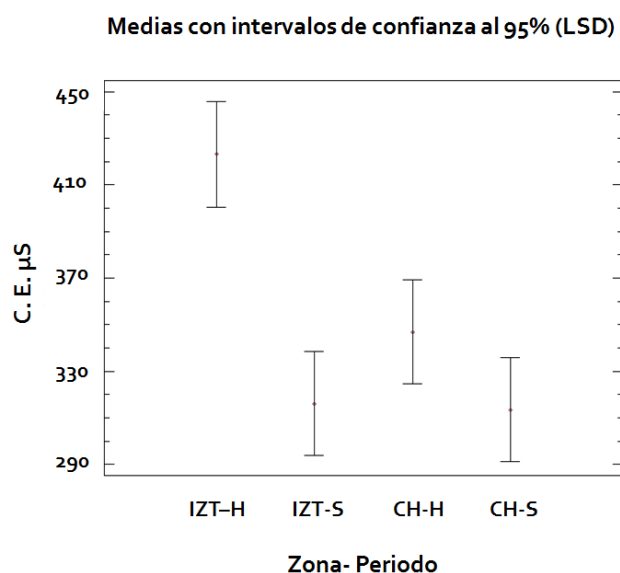


Figura 28. Comparación de medias para la conductividad eléctrica (λ) registrada en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

De acuerdo con lo anterior, la comparación de conductividad eléctrica basada en la media de la varianza en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl entre el periodo húmedo y seco, permite establecer que la temporada de colecta es un factor que determina la conducta temporal del depósito atmosférico; no así, en el Parque Nacional El Chico.

La conductividad eléctrica para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico es significativamente diferente, lo cual coincide con lo mencionado: la estimación de SO_2 en la atmósfera del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl es mayor que la estimada para el Parque Nacional El Chico; autores como Lötschert & Köhm (1978) y Härtel (1980), refieren a la conductividad eléctrica en extractos de corteza como un sensible bioindicador de contaminación ambiental, especialmente de concentración de SO_2 en el aire.



10.6 Metales pesados

El cuadro 8 muestra la concentración promedio de los metales Cd, Cu, Pb y Zn (mgKg^{-1}) registrados en corteza de *Abies religiosa* en el Km 16.5 CPC y El Cedral por periodo. El Cedral registró las concentraciones promedio más altas durante el periodo seco en los metales Cd (0.14 mgKg^{-1}), Pb (0.60 mgKg^{-1}) y Zn (0.75 mgKg^{-1}), mientras que el Km 16.5 CPC mostró mayor concentración en el metal Cu (0.04 mgKg^{-1}) durante el periodo húmedo.

Cuadro 8. Concentración promedio de Cd, Cu, Pb y Zn (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa*, de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl - Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en el periodo húmedo y seco

Metal pesado \ Zona/Periodo	Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés		El Cedral	
	Húmedo	Seco	Húmedo	Seco
Cd	0.13	0.08	0.04	0.14
Cu	0.04	0.03	0.02	0.03
Pb	0.47	0.58	0.47	0.60
Zn	0.68	0.56	0.48	0.75

Lippo *et al.*, 1995 refieren que la concentración promedio en corteza de *Pinus silvestris* L. a escala nacional en Finlandia de los metales Cd (0.31 mgKg^{-1}), Cu (3.6 mgKg^{-1}), Pb (6.3 mgKg^{-1}) y Zn (18 mgKg^{-1}) son similares a las encontradas en musgo y líquen. Las concentraciones promedio de *Abies religiosa* en el presente estudio se encuentran por debajo a lo referido para Finlandia, pero confirman que la corteza arbórea es un excelente material para la determinación de metales pesados producto de depósito atmosférico.

Al comparar las concentraciones del presente estudio, con las reportadas por Reimann & Caritat (1998) para Cd (3.35 mgKg^{-1}), Cu (164 mgKg^{-1}), Pb (349 mgKg^{-1}) y Zn (1500 mgKg^{-1}) en corteza de *Picea abies* de un bosque canadiense, se observa que éstas últimas se encuentran muy por encima a las cuantificadas en *Abies religiosa*; ésta disimilitud se infiere, es debido a que Canadá es una nación industrial y tecnológicamente avanzada; basa su energía en los extensos depósitos de



combustibles fósiles, generación de energía nuclear y energía hidroeléctrica (Moreno & Hernández, 2014); los contaminantes que la industria genera finalmente se depositan en los bosques y otros ecosistemas afectando de manera importante a las especies que allí habitan.

Por otra parte, Chavarría (2005) refiere que las concentraciones de Cu, Pb y Zn de los primeros 15 cm de suelo del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl determinadas mediante técnica PIXE (Emisión de Rayos X Inducida por Partículas) para el año 1999 se encuentran dentro de lo establecido como normal con base a lo determinado por Allen *et al.*, 1974; quien cuantifico diversos elementos en suelos forestales.

De acuerdo con Rocha, 2014 (Cuadro 9), la concentración promedio de los metales Cd, Cu, Pb y Zn en corteza de *Pinus spp* para la zona de paso de Cortés, fue siempre mayor durante el periodo seco; en el presente estudio las mayores concentraciones se presentaron durante el periodo húmedo (Cd 0.13, Cu 0.04 y Zn 0.68 mgKg⁻¹), con excepción del metal plomo (0.58 mgKg⁻¹ durante el periodo seco). En todos los casos, las concentraciones mostradas por *Abies religiosa* son superiores a las de *Pinus spp*; con base en lo anterior se infiere que la corteza de *Abies religiosa* es un sensible captador de metales pesados producto del depósito atmosférico.

Cuadro 9. Concentración promedio de los metales Cd, Cu, Pb y Zn (mgKg⁻¹) en corteza de *Pinus spp* (Rocha, 2014)

Metal	Especie/Periodo	
	<i>Pinus spp</i>	
	Húmedo	Seco
Cd	0.04	0.07
Cu	0.02	0.03
Pb	0.26	0.41
Zn	0.26	0.53

La figura 29 compara gráficamente las concentraciones de Cadmio en corteza de *Abies religiosa* de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo húmedo y seco. Se observa que el Km 16.5 CPC durante el periodo húmedo presentó mayor concentración del metal (>0.14 mgKg⁻¹)



respecto al periodo seco; El Cedral durante el periodo seco muestra mayor concentración ($>0.16 \text{ mgKg}^{-1}$) respecto al periodo húmedo.

De acuerdo con Pais & Benton, 1997 (Cuadro 10) las concentraciones de Cd en el Km 16.5 CPC durante el periodo húmedo y El Cedral durante el periodo seco se encuentran dentro del rango establecido como normal ($0.1 - 10 \text{ mgKg}^{-1}$); no así, las concentraciones del periodo seco y húmedo respectivamente, las cuales se encuentran por debajo a lo establecido.

El Cadmio es un elemento no esencial que puede recorrer largas distancias antes de depositarse en la superficie terrestre (Rodríguez *et al.*, 2008); por lo que se infiere que su presencia dentro del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl procede de las exhalaciones del volcán; así como también de los incendios forestales que se suscitan dentro del parque (de acuerdo con SEDAGRO, 2006 el Estado de México presenta un promedio de 1 409 incendios por año).

En el Parque Nacional El Chico la presencia de este metal se infiere proviene de la explotación minera de cadmio, llevada a cabo en el municipio de Zimapán (137 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico).

La comparación de las concentraciones de Cd de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo húmedo, permiten observar que el primer sitio presenta mayor concentración del metal ($>0.07 \text{ mgKg}^{-1}$); no así, en el periodo seco donde el Cedral exhibe concentración superior ($>0.12 \text{ mgKg}^{-1}$).

Cuadro 10. Rangos normales de Cd, Cu, Pb y Zn en plantas (Pais & Benton, 1997)

Metal pesado	Rangos normales (mgKg^{-1})
Cd	0.1 - 10
Cu	1.0 - 10
Pb	1
Zn	10 – 100 Crítico > 15



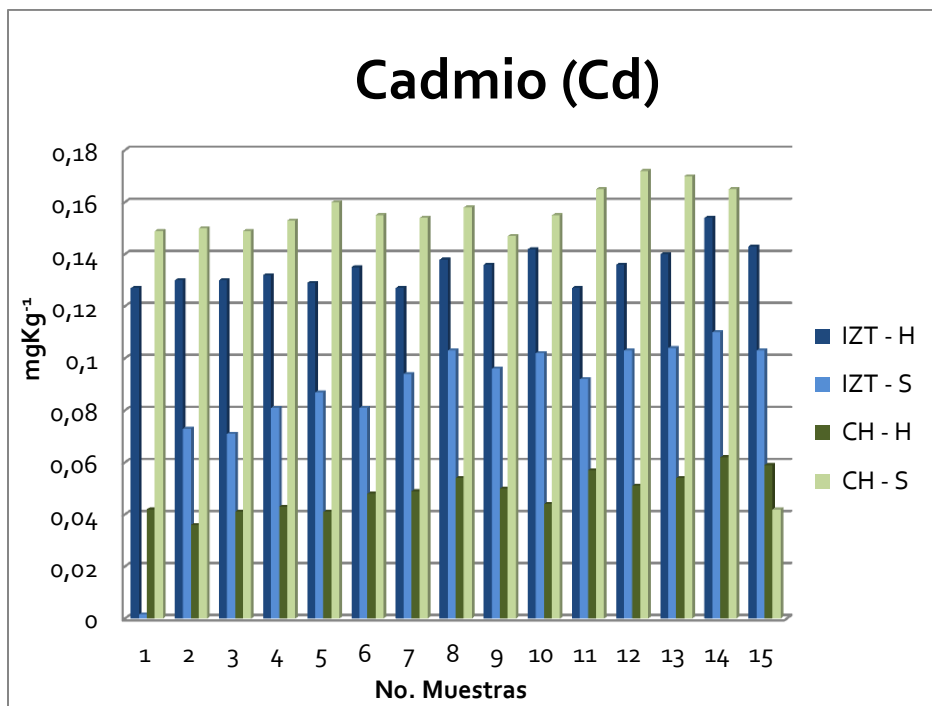


Figura 29. Comparación de las concentraciones de Cd (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

La figura 30 muestra la comparación de medias para el metal Cd (mg/L) registrado en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, de la cual se observa lo siguiente:

- I. Existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
- II. Existe diferencia mínima significativa entre el periodo seco y húmedo en el Parque Nacional El Chico.
- III. Existe diferencia mínima significativa para el periodo húmedo entre el Parque Nacional El Chico e Iztaccíhuatl – Popocatepetl.



- IV. Existe diferencia mínima significativa para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.

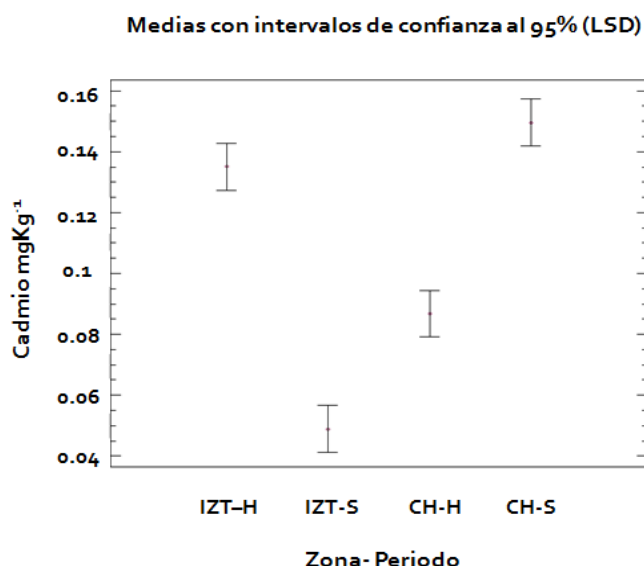


Figura 30. Comparación de medias para el metal cadmio (Cd) registrado en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

De acuerdo con lo anterior, las concentraciones registradas de cadmio (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, se ven influenciadas significativamente por las fuentes contaminantes de este metal, hacia sus bosques.

El mayor aporte de este metal en el Parque Nacional Iztaccíhuatl- Popocatepetl se encuentra en el periodo húmedo; contrario a lo que sucede en el Parque Nacional El Chico, donde el mayor aporte ocurre durante el periodo seco.

La figura 31 compara gráficamente las concentraciones de Cobre en corteza de *Abies religiosa* de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo húmedo y seco. Se observa que para el Km 16.5 CPC el periodo húmedo presenta mayor concentración del metal ($> 0.07 \text{ mgKg}^{-1}$)



respecto al periodo seco; para El Cedral el periodo seco exhibe mayor concentración ($> 0.05 \text{ mgKg}^{-1}$) respecto al periodo húmedo.

De acuerdo con Pais & Benton, 1997 (Cuadro 10) las concentraciones de Cu en los sitios de estudio mencionados; tanto en el periodo húmedo como seco, se encuentran por debajo a lo establecido como normal ($1.0 - 10 \text{ mgKg}^{-1}$).

El Cobre es un elemento esencial para los seres vivos; en plantas los síntomas de deficiencia incluyen clorosis, necrosis (en la punta de la hoja) y malformación de hojas, lo que deriva en insuficiencia de la transferencia de electrones en el proceso de fotosíntesis, pérdida de pigmentos esenciales y degeneración de tilacoides (Furini, 2012).

La presencia de este elemento en Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl se infiere deriva de la actividad volcánica, incendios forestales y vientos cargados de este metal producto de la manufactura.

En el Parque Nacional El Chico la presencia de Cu se infiere procede de la explotación minera del mismo, llevada a cabo en las zonas de Pachuca (29 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico) y Zimapán.

La comparación de las concentraciones de Cu entre los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo húmedo, indican que el paraje correspondiente al Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl presenta mayor concentración del metal ($> 0.07 \text{ mgKg}^{-1}$) respecto al paraje del Parque Nacional El Chico. En el periodo seco, El Cedral muestra mayor concentración ($> 0.05 \text{ mgKg}^{-1}$) con respecto al Km 16.5 CPC.



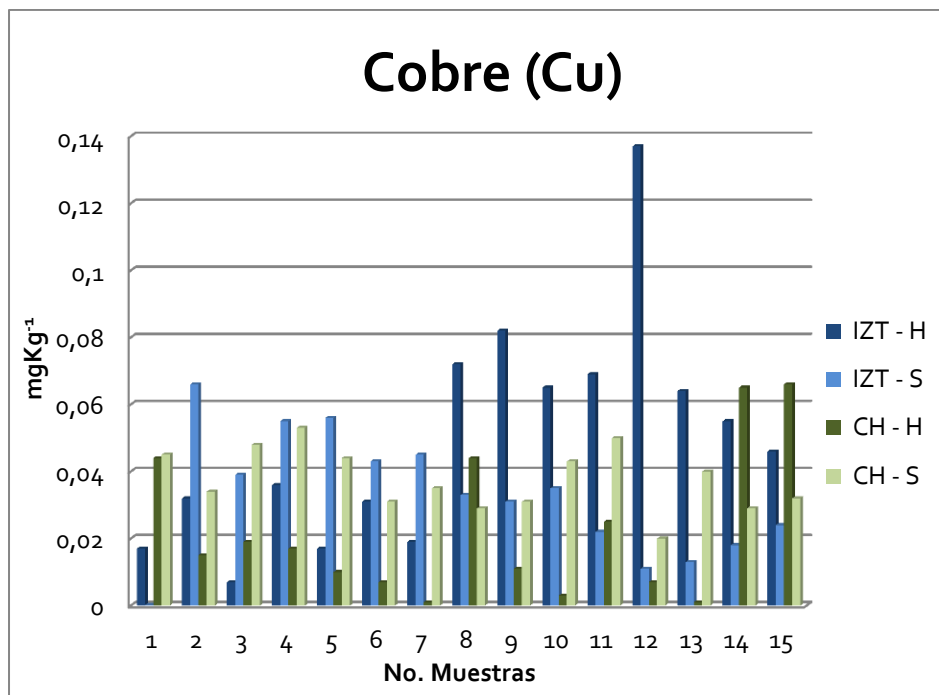


Figura 31. Comparación de las concentraciones de Cu (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

La figura 32 muestra la comparación de medias para el metal Cu (mgKg^{-1}) registrado en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, de la cual se observa lo siguiente:

- I. Existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
- II. No existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional El Chico.
- III. No existe diferencia mínima significativa para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.



- IV. No existe diferencia mínima significativa para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.

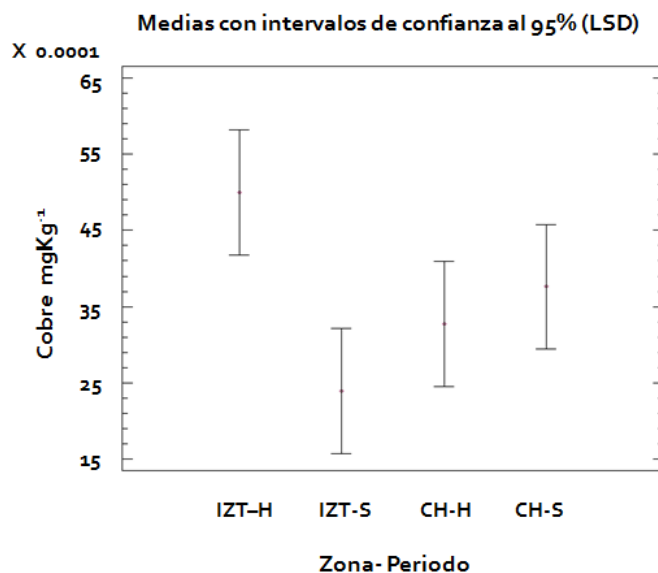


Figura 32. Comparación de medias para el metal cobre (Cu) registrado en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

De acuerdo con lo anterior, la concentración registrada del metal cobre (mgKg⁻¹) en corteza de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl para el periodo húmedo se ve influenciada por las fuentes contaminantes de este metal, contrario a lo que sucede en el periodo seco; sin embargo, no existe diferencia de aporte tanto en el periodo húmedo como seco entre los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.

En el Parque Nacional El Chico los aportes de cobre no se ven influenciados por las fuentes contaminantes cercanas a sus bosques (actividad minera) entre periodos.

La figura 33 compara gráficamente las concentraciones de Plomo en corteza de *Abies religiosa* de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo húmedo y seco. Se observa que,



tanto en el Km 16.5 CPC como en el Cedral el periodo seco manifiesta mayor concentración del metal ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$ para ambos sitios) respecto al periodo húmedo.

De acuerdo con Pais & Benton, 1997 (Cuadro 10) las concentraciones de Pb en el Km 16.5 CPC, se encuentran por debajo a lo establecido como normal para ambos periodos, con excepción de la muestra 4 del periodo húmedo (1.09 mgKg^{-1}).

En el Parque Nacional El Chico las concentraciones del metal en ambos periodos registran niveles inferiores a los reportados como normales (1.0 mgKg^{-1}).

Aunque este metal pesado ha sido eliminado definitivamente de las gasolinas desde el año 1990 (Cortés *et al.*, 2003), las emisiones de plomo derivadas de su reciclaje contaminan a la atmósfera; de acuerdo con Furini (2012) el plomo es un elemento que posee la capacidad de movilizarse por largas distancias.

La presencia de este metal en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl se infiere deriva de la actividad volcánica y de los vientos que traen consigo este metal. En México para el año 2007 se contaba con cinco plantas recicladoras de metales autorizadas, donde el reciclado de baterías con plomo es una práctica común (INE, 2007).

En el Parque Nacional El Chico, la presencia de Pb se infiere proviene de la explotación minera de éste metal llevada a cabo en los municipios de Pachuca, Zimapán, Nicolás de las Flores (142 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico) y El Cardonal (115 Km de distancia aproximada respecto a Mineral El Chico).

La comparación de las concentraciones de Pb entre los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo húmedo indican que, ambos parajes muestran concentraciones similares; no así, para el periodo seco, donde el paraje correspondiente al Parque Nacional El Chico presenta mayor concentración ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$) con respecto al paraje del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.



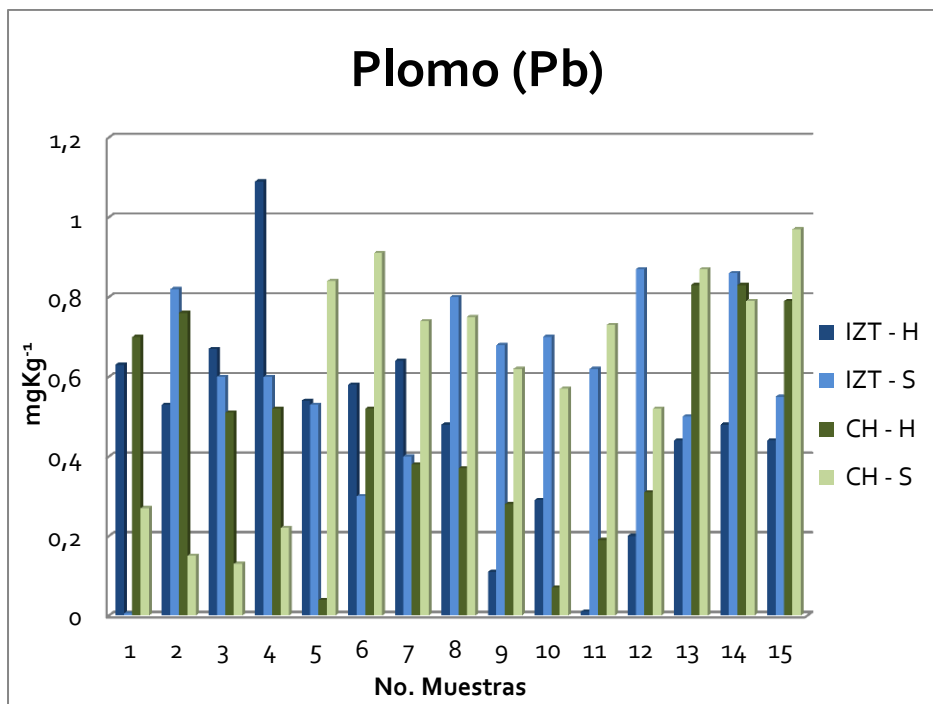


Figura 33. Comparación de las concentraciones de Pb (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

La figura 34 muestra la comparación de medias para el metal Pb (mgKg^{-1}) registrado en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, de la cual se observa lo siguiente:

- I. No existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
- II. No existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional El Chico.
- III. Existe diferencia mínima significativa para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.



- IV. Existe diferencia mínima significativa para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.

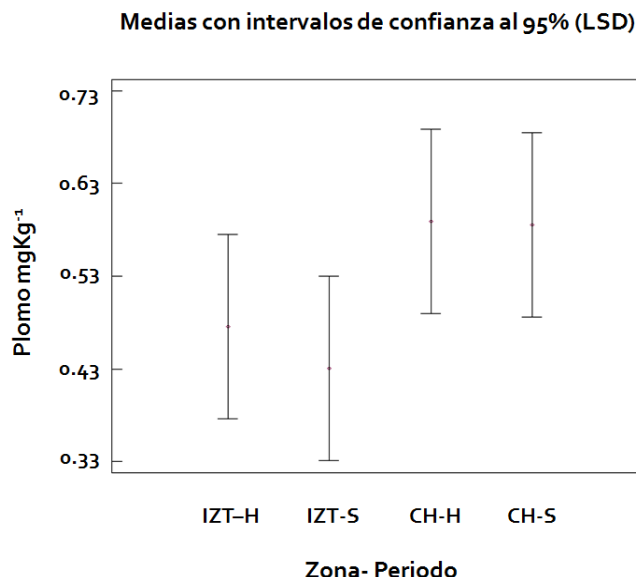


Figura 34. Comparación de medias para el metal plomo (Pb) registrado en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

De acuerdo con lo anterior, las concentraciones registradas de plomo (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* entre los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en el periodo húmedo se ven significativamente influenciadas por las fuentes de emisión de este metal; el mismo comportamiento se observa al contrastar el periodo seco entre ambos parques nacionales. No hay influencia por fuentes de emisión del metal plomo entre el periodo húmedo y seco de manera individual en los parques nacionales.

La figura 35 compara gráficamente las concentraciones de Zinc en corteza de *Abies religiosa* de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral durante el periodo húmedo y seco. Se observa que para el Km 16.5 CPC, el periodo húmedo presenta mayor concentración del metal ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$)



respecto al periodo seco; para El Cedral el periodo seco exhibe concentración mayor ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$) respecto al periodo húmedo.

De acuerdo con Pais & Benton, 1997 (Cuadro 10) las concentraciones de Zn en el Km 16.5 CPC y El Cedral, durante el periodo húmedo y seco se encuentran por debajo a lo establecido como normal ($10 - 100 \text{ mgKg}^{-1}$).

El Zinc es un elemento esencial para los seres vivos; en plantas su deficiencia se manifiesta a través de síntomas como clorosis, necrosis, reducción del crecimiento internodal y reducción de la longitud del tallo; estos últimos provocando que la planta tome forma de roseta (Furini, 2012).

La presencia de este metal en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl, se infiere es derivada de la acción de los vientos provenientes del Distrito Federal que traen consigo este elemento resultante de la producción de acero; de acuerdo con la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (CANACERO), esta entidad tiene registradas 26 industrias de dicho ramo; desde el año 2010 México ocupa el 13vo lugar en producción de acero a nivel mundial (CANACERO, 2015).

Para el Parque Nacional El Chico la presencia de Zn se deduce proviene de la explotación minera de dicho metal llevada a cabo en las zonas de Pachuca, Zimapán, Nicolás de las Flores y El Cardonal.

La comparación de las concentraciones de Zn de los sitios Km 16.5 CPC y El Cedral para el periodo húmedo, indican que el primer sitio presenta mayor concentración ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$); no así, en el periodo seco donde el Cedral exhibe concentración mayor ($> 0.8 \text{ mgKg}^{-1}$).



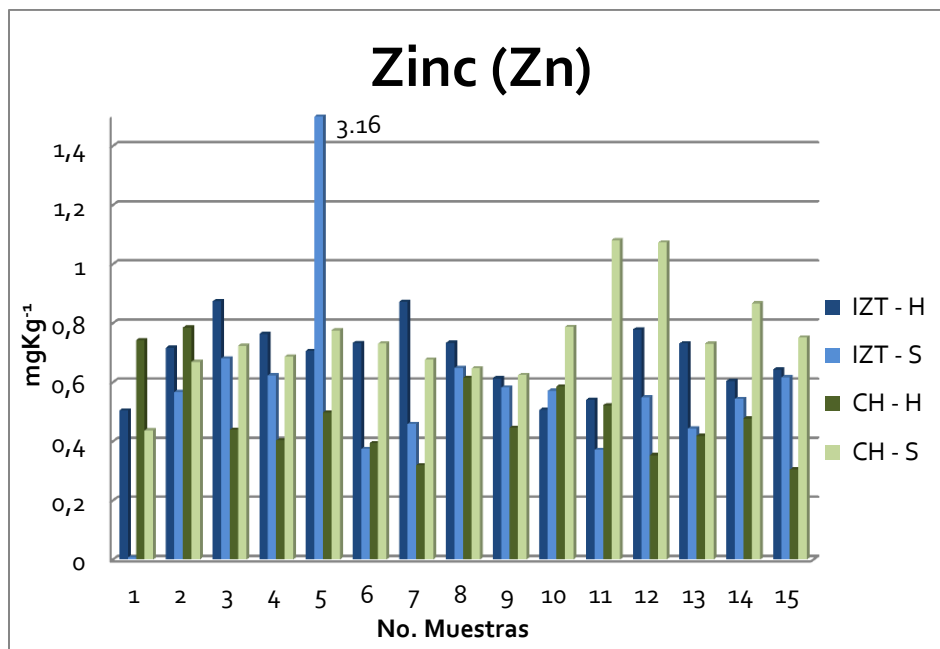


Figura 35. Comparación de las concentraciones de Zn (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para los sitios Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

La figura 36 muestra la comparación de medias para el metal Zn (mgKg^{-1}) registrado en corteza de *Abies religiosa* por el método de diferencia mínima significativa (LSD) al 95% de confianza, de los Parques Nacionales Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico en los periodos húmedo y seco, de la cual se observa lo siguiente:

- I. Existe diferencia mínima significativa entre el periodo seco y húmedo en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
- II. No existe diferencia mínima significativa entre el periodo húmedo y seco en el Parque Nacional El Chico.
- III. No existe diferencia mínima significativa para el periodo húmedo entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.
- IV. No existe diferencia mínima significativa para el periodo seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.



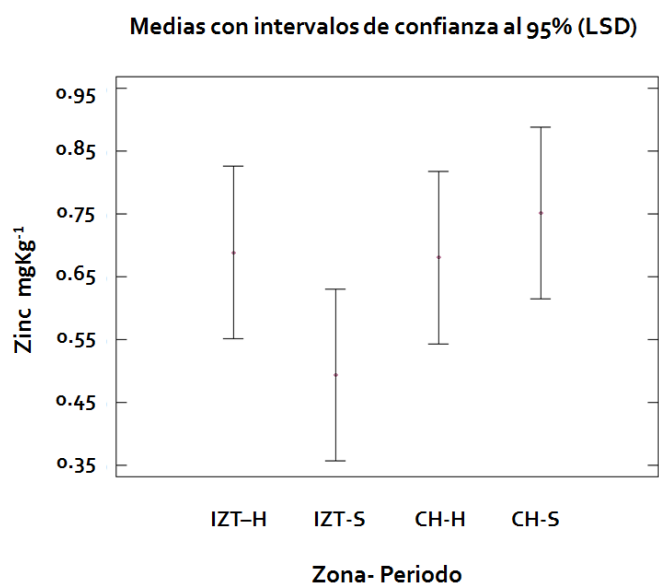


Figura 36. Comparación de medias para el metal zinc (Zn) registrado en corteza de *Abies religiosa* de los parajes Km 16.5 de la carretera a paso de Cortés, Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Cedral, Parque Nacional El Chico en los periodos húmedo (H) y seco (S)

De acuerdo con lo anterior, las concentraciones registradas de zinc (mgKg^{-1}) en corteza de *Abies religiosa* para el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl se ven influenciadas significativamente por las fuentes de emisión de este metal; contrario a lo que sucede en el Parque Nacional El Chico.

No hay influencia por fuentes de emisión del metal zinc tanto en el periodo húmedo y seco entre el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl y El Chico.



11. CONCLUSIONES

- La acidez atmosférica puede monitorearse a través de la corteza de *Abies religiosa*, debido a las características mecánicas y químicas, pues permite la adsorción de contaminantes.
- Los registros de potencial de hidrógeno con la corteza de *Abies religiosa* se encuentran por debajo del valor reportado para el agua de lluvia y de la corteza arbórea.
- El bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional El Chico registró la mayor acidez con respecto al del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl; quizás por la emisión de vapores ácidos de las minas e industria petroquímica ubicada a los alrededores de éste Parque Nacional.
- El periodo húmedo en ambos Parques Nacionales registró el mayor aporte de acidez.
- El Parque Nacional El Chico presenta mayor capacidad de soportar el depósito atmosférico ácido durante el periodo húmedo; situación contraria sucede en el periodo seco.
- El bosque de *Abies religiosa* del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl presentó mayor cantidad de sales registradas a través de la conductividad eléctrica.
- El periodo húmedo en ambos Parques Nacionales registró la mayor cantidad conductividad eléctrica.
- El Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl fue el de mayor registro en los metales Cd, Pb y Zn (mgKg^{-1}) durante el periodo húmedo; mientras que El Parque Nacional El Chico durante el periodo seco; ninguno de estos metales alcanzó niveles tóxicos.
- El metal Cu (mgKg^{-1}) en ambos Parques Nacionales mostró niveles de deficiencia de acuerdo a lo reportado para material vegetal; registrando su mayor nivel durante el periodo seco en el Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.



12. RECOMENDACIONES

-  Aumentar el número de sitios de muestreo (si es posible por cota altitudinal, ya que *Abies religiosa* crece desde los 2100 a los 3600 msnm) y periodos de colecta de los Parques Nacionales El Chico e Iztaccíhuatl – Popocatepetl.
-  Cuantificar iones como NO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- para determinar los aportes puntuales y su afectación en los bosques de *Abies religiosa*.
-  Realizar la cuantificación de acidez y metales pesados con otras especies de coníferas y determinar su sensibilidad.



13. LITERATURA CITADA



Allen S. E., Grimshaw H. M., Parkinson J. A. & Quarmby C. H. 1974. *Ecological Materials*. Ed. John Wiley & Son. Inc. New York. Pp 88-89

ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades). 2007. *División de toxicología y medicina ambiental*. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/es>

Berlizov A. N., Blum O. B., Filby R. H., Malyuk I. A. & Tryshyn V. V. 2007. *Testing applicability of black poplar (Populus nigra L.) bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions*. Sci. Total Environ. 372, 693 - 706.

Bruin de M. 1990. *Indicadores biológicos y análisis por activación neutrónica en estudios de la contaminación atmosférica con metales pesados*. Boletín OIEA 4/1990.

Cabrera C. R., Gordillo M. A. & Cerón B. A. 2003. *Inventario de contaminación emitida a suelo, agua y aire en 14 municipios del estado de Hidalgo, México*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. Vol. 19 Núm. 4: 171-181.

CANACERO (Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero). 2015. Directorio de socios por estado. Disponible en <http://www.canacero.org.mx/Es/estado.html>

Calva V. G., De la Isla B. M. L., Padilla G. H., Vargas H. J. J. & Vásquez M. A. 2006. *La corteza arbórea como biomonitor del depósito ácido en la Cuenca Del Valle De México*. Rev. Ciencia Forestal en México. Vol. 31, No. 100.

Calvert J. G., Lazrus A., Kok G. L., Heikes B. G., Walega J. G., Lind J. & Cantrell C. A. 1985. *Chemical mechanisms of acid generation in the atmosphere*. Nature 317: 27-35

Cervantes C. & Moreno R. 1999. *Contaminación ambiental por metales pesados: impacto en los seres vivos*. México. AGT Editor S.A. 420 PP.



CES (Cooperative Extension Service). 1997. *An introduction to wood anatomy characteristics common to softwoods & hardwoods.* University of Kentucky. Agriculture, home economics, development.



Chavarría Á. R. 2005. Cuantificación retrospectiva (1993-1999) de la deposición ácida en los suelos forestales del Desierto de los Leones, Iztapopo y Zoquiapán y determinación multielemental aplicando la técnica PIXE. Tesis de Licenciatura UNAM, FES- Zaragoza. 131 p.

CONANP. 2005. *Programa de Conservación y Manejo. Parque Nacional El Chico.* Comisión Nacional de Áreas Protegidas. México. 236 p. Disponible en: http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/PN_Chico.pdf

CONANP. 2012. *Programa de Manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl.* México. 125 p. Disponible en: http://iztapopo.conanp.gob.mx/documentos/programa_de_manejo_izta_popo.pdf

Corona R. C. & Calva G. 1987. Reporte técnico de la oficina de factores físicos de la COCODER.

Córtes L. M., Téllez R. M. M., Gómez D. H. & Hernández A. M. 2003. *Tendencia de los niveles de plomo en la atmósfera de la zona metropolitana de la Ciudad de México. 1988-1998.* Salud Pública. Vol. 45 (sup 2):196-202.

Cullis C. F. & Hischler M.M. 1980. *Atmospheric sulphur. Natural and man made sources.* Atmos. Environ., 14, 1263-1278.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2013. *Acuerdo por el que se da a conocer el resumen del programa de manejo del Parque Nacional Iztaccíhuatl – Popocatepetl.* Disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5294188&fecha=02/04/2013

El-Hasan T., Al-Omari H., Jiries A. & Al-Nasir F. 2002. *Cypress tree (Cupressus semervirens L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan.* Environment International 28: 513– 519.



Evans L. S. 1984. *Botanical aspects of acidic precipitation*. Bot. Rev., 50, 449-490

FIMEVICDF (Fideicomiso para el Mejoramiento de las Vías de Comunicación del Distrito Federal).

2012. *Diagnóstico de la movilidad en la Ciudad de México*. Gobierno del Distrito Federal.

Disponible en: <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm>

Furini A. 2012. *Plants and heavy metals*. Ed. Springer. Verona, Italy 86p.

Galloway J. N., Likens G. E., Keene W. C. & Miller J. M. 1982. *The composition of precipitation in remote areas of the world*. J. Geophys. Res., 87, 8771-8786.

GDF. 2006. *Inventario de emisiones a la atmósfera de la Zona Metropolitana del Valle de México 2004*.

Disponible en: www.sma.df.gob.mx/sma/index.php?opcion=10

GDF. 2008. *SIMAT*. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/simat/home_base.php

Godbold D. L., Fritz E., Hüttermann A. 1988. *Aluminium toxicity and forest decline*. Proceedings of the National Academy of Sciences. USA 85:3888-3892.

Granados S. D., López R. G., Hernández G. M. 2010. *La lluvia ácida y los ecosistemas forestales*.

Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2):187-206.

Grodzinska K. 1977. *Acidity of tree bark as a bioindicator of forest pollution in Southern Poland*. Water, Air and Soil Pollution 8:3-7.

Härtel O. 1982. *Pollutants accumulation by bark*. In: Steubing L. & Jäger H. J. (Eds.) *Monitoring of Air Pollutants by Plants – Methods and Problems*. Dr W. Junk Publishers. The Hague, pp. 137-147.

Henri J. G. & Heinke G. W. 1999. *Ingeniería ambiental*. Segunda Edición. Ed. Prentice Hall. México. 800 pp.

INE. 2005. *Aire*. Disponible en: www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/16/parte4_17.html

INE. 2007. *Lo que usted debe saber sobre el plomo*. Disponible en <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/folletos/98/98.html>





<http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>

Jasan R., Verbug T., Wolterbeek T., Plá R. & Pignata M. 2004. *On the use of the lichen Ramalina celastri (Spreng). Krong. & Swincs as an indicator of atmospheric pollution in the province of Córdoba, Argentina considering both lichen physiological parameters and element concentrations.* Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 259:93.

Johnsen I. & SØchting U. 1973. *Influence of air pollution on the epiphytic lichen vegetation and bark properties of deciduous trees in the Copenhagen area.* Oikos 24, 344.

Kabata A. & Pendias H. 1992. *Trace elements in soils and plants.* 2nd Edition. CRC Press. USA. 365 p.

Lendzian K. J & Unsworth M. S. 1983. *Ecophysiological effects of atmospheric pollutants.* En: Encyclopedia of Plant Physiology, Physiological Plant Ecology, IV, pp. 412-502

Lippo H., Poikolainen J. & Kubin E. 1995. *The use of moss, lichen and pine bark in the nationwide monitoring of the atmospheric heavy metal deposition in Finland.* Water, Air, Soil Pollution 85:2241–6.

López L. A. B. 2010. *Variación del pH de agua de lluvia en bosques templados húmedos.* Tesis de Licenciatura. FES- Zaragoza, UNAM. 64 p.

Lötschert W. & Köhm H. J. 1977. *Characteristics of tree bark as an indicator in high-immission areas.* Oecologia 27: 47–64.

Madrigal S. X. 1967. *Contribución al conocimiento de la ecología de los bosques de oyamel (Abies religiosa (H.B.K.) Schl. et Cham.) en el valle de México.* Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Boletín técnico No. 18. México D.F. 94 p.

Majolagbe A. O., Paramole A. A., Majolagbe H. O., Oyewole O. & Sowemino M. O. 2010. *Concentration of heavy metals in tree barks as indicator of atmospheric pollution in Oyo Town,*



Southwest, Nigeria. Scholars Research Library. Archives of Applied Science Research, 2 (1):170-178.



Marín A. M. 2008. *Determinación de metales pesados (Pb, Cd, Zn, Mn y Cu) en cenizas del volcán Popocatepetl*. Tesis de licenciatura, UNAM. 89 pp.

Martin R. E. & Gray G. R. 1971. *pH of southern pine barks*. Forest Products Journal. Vol. 21, No. 3:49-52.

Martínez M. 1963. *Las Pináceas Mexicanas*. UNAM. 3ra edición. México, D.F. 400 p.

Medina J. M. & Rzedowsky J. 1981. *Guía botánico-forestal de la parte alta de la Sierra de Pachuca*. En: Guías Botánicas de Excursiones en México. Sociedad Botánica de México, (IV):1-19.

Melo G. C. & López G. J. 1993. *Parque Nacional El Chico, marco geográfico-natural y propuesta de zonificación para su manejo operativo*. Investigaciones Geográficas del Instituto de Geografía, UNAM, número 28, México, 1994. 65-128 pp

Moreno O. M. & Hernández C. F. 2014. *Los aspectos más relevantes en la economía de Canadá a raíz de la crisis económica mundial*. Observatorio de la Economía Latinoamericana N° 201. Disponible en <http://www.eumed.net/cursecon/ecolat/mx/2014/canada-mexico.html>

Muñoz C. R., López-Venegas G. S. & Campos-Díaz A. 2008. *Estado de la lluvia ácida en la zona metropolitana del Valle de México*. Disponible en: www.sma.df.gob.mx/simat/pdf/edo_lluvia_acida_zmvm.pdf.

NAPD (National Atmospheric Deposition Program). 1999. *Annual Summary*. Disponible en: <http://nadp.sws.uiuc.edu/lib/data/ggas.pdf>

Newman E. I. 1995. *Phosphorus inputs to terrestrial ecosystems*. Journal of Ecology 83: 713-726.

Noyola R. J. & Méndez L. G. 2012. *Tlalmanalco. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México*. Disponible en <http://e-local.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM15mexico/municipios/15103a.html>



Ortega J. H. 1962. *Propiedades físicas y mecánicas de la madera de Abies religiosa (H.B.K.) Schl. et Cham. y Pinus hartweggi.* Lind. Tesis profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.

82

Pais I. & Benton J. 1997. *The handbook of trace elements.* St. Lucie Press. USA.

Pardos J. A. 2006. *La contaminación atmosférica y los ecosistemas forestales.* Invest Agrar: Sist Recur For. 55-70

Patiño H. X. 2011. *Caracterización de la depositación húmeda y seca en el Parque Nacional El Chico, Mineral del Chico, Hidalgo, México: Implicaciones de la contaminación atmosférica.* Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 99 p.

Perelman P., Castro M. A., Navarro L. E., Rechi M., Arriaga M., López S. & Martínez C. E. 2006. *Análisis multielemental de cortezas de fresno (Fraxinus pennsylvanica) a lo largo del gradiente urbano-periurbano en la metrópolis de Buenos Aires.* Rev. Mus. Argentino Cienc. Nat., n.s. 8(2):231-236.

Perelman P., Martínez C. E., Moreno G., Castro M. A. & Faggi, A. 2007. *El uso de corteza de mora (Morus alba) como biomonitor para detectar contaminación en la ciudad de Mendoza.* Hologramática. Facultad de Ciencias Sociales UNLZ. Año VI, Número 7, VI, pp.135-144.

Pitts F. J. & Pitts N. 2000. *Chemistry of the upper and lower atmosphere.* Academic Press. USA.

Reimann C. & Caritat P. 1998. *Chemical elements in the environment.* Factsheets for the geochemist and environment scientis. Springer. Germany. 385 p.

Rocha G. E. R. 2014. *Uso de corteza de Pino (Pinus spp.) como boindicador de depósito ácido y metales pesados en el Parque Nacional Izta – Popo.* Reporte de Servicio Social. FES- Zaragoza, UNAM.

Rodríguez S. M., Martínez C. N., Romero P. M. C., Del Río M. A. & Sandalio L. M. 2008. *Toxicidad del cadmio en plantas.* Ecosistemas 17 (3): 139-146.

Rzedowsky J. 1986. *La Vegetación de México.* Ed. Limusa. México. 432 pp.



Santamaría J. M. & Martín A. 1997. *Tree bark as a bioindicator of air pollution in Navarra, Spain*. Kluwer



Academic Publishers. Water, Air, and Soil Pollution 98: 381-387.

Santa R. I., Gallardo J. F., San Miguel C. & Moyano A. I. 1989. *Intercepción, pluviolavado y escorrentía cortical en una plantación de Pinus sylvestris de la Cuenca de Candelario (centro – oeste de España)*. Bosque: 10 (1): 19-27.

SEDAGRO (Secretaría de Desarrollo Agropecuario). 2006. *Programa de Desarrollo Forestal Sustentable del Estado de México 2005-2025*. Disponible en <http://www.edomex.gob.mx/pbq/docs/pdf/progforestalo525.pdf>

SEMARNAT. 2012. *Lluvia ácida: Causas y consecuencias*. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/05_atmosfera/recuadro2.html

SGM (Servicio Geológico Mexicano). 2011. *Panorama Minero del Estado de Hidalgo*. Secretaria de Economía. Disponible en <http://www.sgm.gob.mx/pdfs/HIDALGO.pdf>

Singh A. & Agrawal M. 2008. *Acid rain and its ecological consequences*. Journal of Environmental Biology 29(1), 15-24.

SMA. 2009. *Calidad del aire en la Ciudad de México*. Informe 2008. Disponible en: http://www.sma.df.gob.mx/sma/links/download/archivos/informe2008/informe_anual_2008_j_capo7lluvia_acida.pdf

SMA. 2012. *Calidad del aire en la Ciudad de México*. Informe 2011. Disponible en <http://www.calidadaire.df.gob.mx/calidadaire/informes/informe2011/>.

Slatyer R. O. 1962. *Measurement of precipitation interception by and arid zone plant community (Acacia aneura F. Muell)*. Methodologie en Ecophysiologie Végétale. ECKARDT, F.E. (ed). Actes Colloque de Montpellier, UNESCO, 181-192.

Staxäng B. 1969. *Acidification of bark of some deciduous trees*. Oikos 20:2:16.



Steubing L., Godoy R. & Alberdi M. 2002. *Métodos de ecología vegetal*. Ed. Universitaria Santiago de Chile, Chile pp 345.



Turkey H. B. 1970. *The leaching of substances from plants*. A. Rev. Pl. Physiol. 21: 305-324

Volke T., Velasco A. & De la Rosa. 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. SEMARNAT e INE. México. 141 pp.

