



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

*Caracterización de iones ácidos (sulfatos, nitratos y cloruros) en dos  
zonas boscosas del Valle de México (Parques Nacionales  
Iztapopocatepetl y Desierto de los Leones)*

**T E S I S**  
**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**  
**B I Ó L O G O**  
**P R E S E N T A:**

**MANUEL HERNÁNDEZ ALMAZÁN**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ**



**MEXICO, D. F.**

**SEPTIEMBRE DE 2008**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## AGRADECIMIENTOS

---

*A quién decidió compartir su vida conmigo, me ha alentado y apoyado para cerrar este ciclo que termina. Mi amiga y esposa.....*  
.....**Yolanda**

*A mis padres por darme las bases para seguir el camino de la vida, para ustedes.....***Francisca y Jesús Manuel**

*A mis hermanas por todos los momentos que hemos vivido juntos.....***Carolina y Alma Judith**

*A los dos pequeños pingos por sus juegos, momentos de alegría que hemos compartido.....***Iván y Vanesa**

*Al gran jefe por todo su apoyo, su amistad, por hacerme comprender que la parte académica también tiene un lado humano y ser una gran maestro.....***Germán**

*A la Miss por sus consejos y apoyo.....***Maestra Ángeles**

*A mis sinodales por sus puntos de vista, observaciones para mejorar este trabajo.....***Armando, Efraín y Aída**

*A todas las personas que hicieron posible este trabajo, así como a los compañeros del laboratorio con los que compartir tantos momentos tanto aciagos como alegres*

# INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>4</b>
<b>III. OBJETIVOS</b> .....	<b>7</b>
3.1 GENERAL .....	7
3.2 PARTICULARES.....	7
<b>V. HIPOTESIS</b> .....	<b>8</b>
<b>V. MARCO TEORICO</b> .....	<b>9</b>
5.1 ECOSISTEMAS Y EL DEPÓSITO ÁCIDO ATMOSFÉRICO .....	9
5.2 CONSECUENCIAS DE LA DEPOSITACIÓN ÁCIDA EN LOS BOSQUES .....	12
5.3 LA CAPTACIÓN DEL DEPÓSITO ÁCIDO ATMOSFÉRICO .....	15
5.4 SÍNTESIS ATMOSFÉRICA DE LOS ÁCIDOS .....	17
5.5 PROCESOS DE INCORPORACIÓN DEL DEPÓSITO ÁCIDO .....	19
5.7 FUENTES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS .....	20
5.8 QUÍMICA DE LA DEPOSITACIÓN .....	21
5.6 LA LLUVIA ÁCIDA EN MÉXICO.....	25
5.9 CARACTERÍSTICAS DE LA CORTEZA.....	26
<b>VI. DESCRIPCION DE LAS ESPECIES</b> .....	<b>29</b>
6.1 ABIES RELIGIOSA (HBK.) SCHLTDL. ET CHAM. ....	29
6.2 PINUS MONTEZUMAE LAMB. ....	30
6.3 CUPRESSUS LINDLEYI KLOTZSCH.....	31
<b>VII. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO</b> .....	<b>33</b>
7.1 PARQUE NACIONAL “DESIERTO DE LOS LEONES” .....	33
7.2 PARQUE NACIONAL “IZTAPOCATEPETL” .....	35
<b>VIII. METODO</b> .....	<b>38</b>
8.1 FASE DE GABINETE.....	38

8.2 FASE DE CAMPO .....	38
8.3 FASE DE LABORATORIO .....	39
<b>IX. DISCUSION DE RESULTADOS .....</b>	<b>41</b>
9.1 EVALUACIÓN DEL DEPÓSITO ÁCIDO .....	42
<i>9.1.1 Sulfatos</i> .....	42
9.1.1.1 Análisis Especie vs Temporada .....	42
9.1.1.2 Análisis entre Especies .....	43
9.1.1.3 Análisis Temporal.....	44
9.1.1.4 Análisis Espacial.....	46
9.1.1.5 Análisis Especie-Espacial .....	48
<i>9.1.2 Nitratos</i> .....	50
9.1.2.1 Análisis Especie vsTemporada .....	50
9.1.2.2 Análisis entre Especies .....	51
9.1.2.3 Análisis Temporal.....	52
9.1.2.4 Análisis Espacial.....	54
9.1.2.5 Análisis Especie-Espacial .....	55
<i>9.1.3 Cloruros</i> .....	57
9.1.3.1 Análisis Especie vs Temporada .....	57
9.1.3.2 Análisis entre Especie.....	58
9.1.3.3 Análisis Temporal.....	59
9.1.3.4 Análisis Espacial.....	60
9.1.3.5 Análisis Especie-Espacial .....	61
9.2 EVALUACIÓN DE LOS INDICADORES DEL DEPÓSITO ÁCIDO .....	63
<i>9.2.1 Conductividad eléctrica</i> .....	63
9.2.1.1 Análisis Especie vs Temporada .....	63
9.2.1.2 Análisis entre especies .....	64
9.2.1.3 Análisis Temporal.....	65
9.2.1.4 Análisis Espacial.....	67
9.2.1.5 Análisis Especie-Espacial .....	68
<i>9.2.2 Iones Hidronios [H<sup>+</sup>]</i> .....	70

9.2.2.1 Análisis Especie vs Temporada .....	70
9.2.2.2 Análisis entre Especies .....	71
9.2.2.3 Análisis Temporal.....	73
9.2.2.4 Análisis Espacial.....	74
9.2.2.5 Análisis Especie-Espacial .....	75
9.2.3 <i>Potencial de Hidrogeno</i> .....	76
9.2.3.1 Análisis Especie vs Temporada .....	76
9.2.3.2 Análisis entre Especies .....	78
9.2.3.3 Análisis Temporal.....	79
9.2.3.4 Análisis Espacial.....	81
9.2.3.5 Análisis Especie-Espacial .....	82
<b>X. CONCLUSIONES.....</b>	<b>84</b>
<b>XI. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>
<b>XII. ANEXOS.....</b>	<b>93</b>
12.1 TECNICAS DE DETERMINACION DE IONES.....	93
12.2 TABLAS DE MEDIAS Y CONTRASTES, MANOVA PRUEBA TUKEY $\alpha=0.05$ .....	97

## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. CONCENTRACIONES DE IONES ACIDIFICANTES REPORTADOS EN ESTADOS UNIDOS Y CANADÁ. ....	5
FIGURA 2. MUERTE DEL OYAMEL EN DESIERTO DE LOS LEONES (1984) FOTOGRAFÍA TOMADA POR WILLIAM M. CIESLA DEL PROGRAMA THE BUGWOOD NETWORK AND USDA FOREST SERVICE. UNIVERSIDAD DE GEORGIA (2006) .....	6
FIGURA 3: EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA AL ÁRBOL. ....	9
FIGURA 4: MAPA DE SENSIBILIDAD DE LOS ECOSISTEMAS AL DEPÓSITO ÁCIDO, EL COLOR ROJO ÍNDICA LA MAYOR SENSIBILIDAD Y CAFÉ DE MENOR SENSIBILIDAD (KUYLENSTERN, ET AL, 1995). ....	11
FIGURA 5. HIPÓTESIS DE LAS MUERTES MASIVAS .....	14
FIGURA 6. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS VS. MECANISMOS DE INCORPORACIÓN (TOMADO DE CALVA, 1999) .....	16
FIGURA 7. FORMACIÓN DEL DEPÓSITO ÁCIDO ATMOSFÉRICO A PARTIR DE LAS EMISIONES DE AZUFRE Y NITRÓGENO. ....	18
FIGURA 8. RUTAS ATMOSFÉRICAS QUE CONLLEVAN A LA DEPOSITACIÓN ÁCIDA EN CALVA (1999).....	19
FIGURA 9. ANATOMÍA DEL TRONCO DE UN ÁRBOL.....	28
FIGURA 10. ABETO U OYAMEL (ABIES RELIGIOSA (HBK.)) SCHLTDL. ET CHAM. FOTO TOMADA POR JEFF BISBEE (ARBORETUM DE VILLARDEBELLE, 2005) .....	29
FIGURA 11. PINO (PINUS MONTEZUMAE LAMB.) FOTO TOMADA POR MICHAEL P. FRANKIS (ARBORETUM DE VILLARDEBELLE, 2005) .....	30
FIGURA 12. CEDRO BLANCO (CUPRESSUS LINDLEYI KLOTZSCH). FOTO TOMADA POR JEFF BISBEE (ARBORETUM DE VILLARDEBELLE, 2005).....	32
FIGURA 13. UBICACIÓN DENTRO DE LOS PARQUES NACIONALES DESIERTO DE LOS LEONES (DDL) E IZTAPOPOCATEPETL (I-P) EN LA CUENCA DE MÉXICO .....	33
FIGURA 14. MAPA CONCEPTUAL DEL PROCEDIMIENTO USADO. ....	40
FIGURA 15. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE SULFATOS .....	42
FIGURA 16. ANÁLISIS POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE SULFATOS .....	43
FIGURA 17. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA DEPOSITACIÓN DE SULFATOS.....	45
FIGURA 18. ANÁLISIS ESPACIAL DE LA DEPOSITACIÓN DE SULFATOS.....	47
FIGURA 19. ANÁLISIS ESPECIE-ESPACIAL DEL DEPÓSITO DE SULFATOS.....	49

FIGURA 20. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE NITRATOS .....	50
FIGURA 21. ANÁLISIS POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE NITRATOS .....	52
FIGURA 22. ANÁLISIS TEMPORAL DEL DEPÓSITO DE NITRATOS.....	53
FIGURA 23. ANÁLISIS ESPACIAL DEL DEPÓSITO DE NITRATOS.....	54
FIGURA 24. ANÁLISIS ESPECIE-ESPACIAL DE NITRATOS .....	56
FIGURA 25. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE CLORUROS .....	57
FIGURA 26. ANÁLISIS POR ESPECIE DEL DEPÓSITO DE CLORUROS .....	59
FIGURA 27. ANÁLISIS TEMPORAL DEL DEPÓSITO .....	60
FIGURA 28. ANÁLISIS ESPACIAL DEL DEPÓSITO DE CLORUROS .....	61
FIGURA 29. ANÁLISIS ESPECIE-TEMPORAL DEL DEPÓSITO DE CLORUROS.....	62
FIGURA 30. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	63
FIGURA 31. ANÁLISIS POR ESPECIE DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA .....	65
FIGURA 32. ANÁLISIS TEMPORAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	66
FIGURA 33. ANÁLISIS ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	67
FIGURA 34. ANÁLISIS ESPECIE-ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	69
FIGURA 35. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DE IONES HIDRONIOS.....	70
FIGURA 36. ANÁLISIS POR ESPECIE DE IONES HIDRÓNIOS.....	72
FIGURA 37. ANÁLISIS TEMPORAL DE LOS IONES HIDRONIOS .....	73
FIGURA 38. ANÁLISIS TEMPORAL DE LOS IONES HIDRONIOS.....	74
FIGURA 39. ANÁLISIS ESPECIE-ESPACIAL DE LOS IONES HIDRÓNIOS. ....	76
FIGURA 40. ANÁLISIS TEMPORAL POR ESPECIE DEL pH.....	77
FIGURA 41. ANÁLISIS POR ESPECIE DEL pH.....	79
FIGURA 42. ANÁLISIS TEMPORAL DEL pH .....	80
FIGURA 43. ANÁLISIS ESPACIAL DEL pH .....	81
FIGURA 44. ANÁLISIS ESPECIE-ESPACIAL DEL pH .....	82
FIGURA 45. DETERMINACIÓN DE SULFATOS POR MÉTODO TURBIDIMÉTRICO. ....	93
FIGURA 46. DETERMINACIÓN DE NITRATOS POR MÉTODO DE IÓN SELECTIVO .....	94
FIGURA 47. DETERMINACIÓN DE CLORUROS POR EL MÉTODO TURBIDIMÉTRICO.....	95
FIGURA 48. DETERMINACIÓN DE pH Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN EXTRACTOS DE CORTEZA .....	96



## INDICE DE CUADROS

CUADRO 1: REGISTRO DE LA PRECIPITACIÓN ÁCIDA EN DIFERENTES DELEGACIONES DE LA CIUDAD DE MÉXICO. ....	4
CUADRO 2. PROGRAMAS DE INVESTIGACIÓN CREADOS PARA EL ESTUDIO DE INCIDENCIA DE CONTAMINACIÓN.....	10
ATMOSFÉRICA Y DEPOSITACIÓN ACIDA (BONNEAU Y LANDMAN, 1989; HOWELL 1990; RODHE YHERRERA, EN CALVA, 1999).....	10
CUADRO 3: SENSIBILIDAD DE LOS TIPOS DE SUELO DE ACUERDO A SU CAPACIDAD DE AMORTIGUAMIENTO.....	12
(KUYLENSTERNA, <i>ET AL</i> , 1995).....	12
CUADRO 4: ETAPAS DEL DECLINE FORESTAL DEBIDO AL ESTRÉS POR CONTAMINACIÓN DEL AIRE .....	15
(BOARMANN, 1982).....	15
CUADRO 5: GRUPOS DE IONES ORGÁNICOS E INORGÁNICOS CONTEMPLADOS DENTRO DEL DEPÓSITO ÁCIDO .....	18

## RESUMEN

---

El presente trabajo tiene por objeto cuantificar el depósito atmosférico en la corteza de *Abies religiosa*, *Pinus montezumae* y *Cupressus Lindelyii*, es por ello, que no solamente explica la composición química de las emisiones, si no también su dispersión espacio-temporal en la superficie del bosque dentro de la Cuenca de México. Existen referencias internacionales en donde se cita a la corteza arbórea como una esponja que absorbe una gran cantidad de partículas contaminantes atmosféricas.

Se ubico el bosque de pino-oyamel, con presencia de cedro en los Parques Nacionales Desierto de los Leones (DDLL) e Iztapopocatepetl (I-P) en mapa topográfico de las zonas de estudio. Ahí se seleccionaron árboles a través del método del vecino más cercano. A cada árbol se le retiro un aproximado de 75g de corteza, ésta se limpio, seco, molió y cernió (malla de 1 mm) de acuerdo a lo descrito por Grodzinska (1971) y Martin y Gray (1971). Se pesaron 2g de cada corteza molida por cada árbol, hidratándose con 10 ml de agua desionizada para pino y abeto, 15 ml para cedro, refrigerándose por un período de 48 hrs para la posterior cuantificación de pH, y conductividad eléctrica.

La cuantificación de sulfatos y cloruros se realizó por la técnica nefelométrica (Snell y Snell, 1949) y nitratos por potenciometría (APHA, AWWA y WMO, 1993). Se formaron tres macromuestras por línea de 175g cada una las cuales se hidrataron con 560 ml de agua desionizada para cedro, 280 ml para pino y abeto; se realizo una extracción en frío por 48 hrs para su posterior filtrado a vacío con filtro millipore de 47 nm, de cada macromuestra se analizaron tres alícuotas.

De los resultados se concluyó que:

- a. La corteza arbórea es un biomonitor sensible que permite conocer el estado del depósito atmosférico del ecosistema, y permite establecer el estado del ecosistema de manera eficaz y a un bajo costo.
- b. La técnica de ion selectivo es sensible para cuantificar sulfatos, cloruros y nitratos en extractos acuosos de corteza arbórea.
- c. Las propiedades físicas de la corteza, diferentes en cada una de las especies, fueron determinantes para el registro y la acumulación de los iones, en conjunto con humedad, temperatura y época del año.
- d. El aporte de sulfatos, cloruros y nitratos a la protonización del ecosistema fue determinante por vía seca.
- e. El depósito atmosférico en I-P y DDLL fue homogéneo cuantitativamente y cualitativamente.
- f. En orden decreciente se determino que la sensibilidad de las especies para el biomonitoreo fue pino>abeto>cedro.

El oyamel es el biomonitor sensible para sulfatos.

El pino es el biomonitor sensible para nitratos.

No se determino un biomonitor sensible para cloruros.

## INTRODUCCIÓN

---

El presente trabajo es una línea de investigación dentro del programa de "Cuantificación de la Depósito Atmosférico en cuatro Zonas Boscosas del Valle de México", el cual abarca diversos estudios, a saber: **efecto del depósito atmosférico** en **suelo**, la **acumulación de los elementos en los anillos de crecimiento** (dendroquímica) y la **ecología forestal** (monitoreo de los indicadores de salud). El depósito atmosférico en hojas de los árboles y su acumulación de iones en corteza del árbol no solamente explica la composición química de las emisiones, si no también su dispersión espacio-temporal en la extensión de bosque dentro de la Cuenca de México.

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas en las principales ciudades del mundo por ejemplo: Tokio (Japón), Nueva Delhi (India), Los Ángeles (USA), Santiago (Chile) y en México, desde 1970 hasta la actualidad, debido a la elevada cantidad de emisiones industriales y vehiculares, entre otras. En la atmósfera se transportan los diversos contaminantes a grandes distancias, los cuales se depositan de acuerdo a su tamaño de la partícula y por efecto de la gravedad, químicamente por los radicales oxidrilo que son el sistema de autopurificación del aire (Tyler, 1994; Calvert, 1985).

El depósito ácido es un fenómeno por el cual se liberan (suelo y/o vegetación) o hidrónios de los ácidos orgánicos e inorgánicos formados en la atmósfera. Así que desde el punto de vista químico, se encuentran varios iones (sulfatos, sulfitos, nitratos, nitritos o cloruros) y sustancias ácidas (bisulfato ácido de amonio, ácidos minerales) o potencialmente ácidas (Ozono, aldehídos, cetonas, entre otros) (Calva, 1999),

Es por ello que al cuantificar el depósito de los sulfatos, cloruros y nitratos en los bosques de pino-oyamel que se lavan de la copa (leaching canopy) y que se suman al escurrimiento del tronco (stemflow) durante los meses de sequía o

de lluvia, nos permite comprender la entrada de protones al ecosistema (protonización). El Intercambio de elementos y de iones que se propicia entre la atmósfera y el árbol (estomas y raíces), y a su vez, con el suelo forestal es de un equilibrio dinámico, en el que se involucran el ciclo de los elementos biogénicos, oligoelementos, macro y micro elementos.

Una de las técnicas mas utilizada para la evaluación del depósito ácido en zonas apartadas es el biomonitorio en zonas apartadas en las cuales los sensores automáticos tienen limitaciones. Los métodos indirectos a través de corteza y hojas de árboles, se han utilizado desde los 70's, basado en la presencia o ausencia de líquenes y musgos sensibles a polución. Dentro de los primeros se encuentran las coníferas y algunos árboles de hoja caediza que son sensibles a la depositación (Härtel, 1982; Swieboda y Kalemba, 1979).

El biomonitorio con corteza arbórea externa se fundamenta en los niveles de contaminantes depositados en ella, son reflejo de de la contaminación ambiental, al acumularse en la superficie formada por células muertas, tejido que no es pasivo o activo en la translocación de los elementos presente en la madera, los movimientos radiales como el transporte axial desde las raíces hasta los órganos influyen en la composición de la corteza, dependiendo de la movilidad de cada elemento (Calva,1999) permitiendo la cuantificación analítica de los mismos de una manera confiable a bajo costo, al ser un método eficaz.

Por lo anterior, diversos investigadores como Grodzinska (1971, 1977, 1978, 1979, 1980), Lötschert y Köhm (1971, 1977), Härtel y Grill (1972), Johnsen y Schøting (1973), Swiemboda y Kalemba (1979), Kreiner (1986), entre otros; caracterizaron diferentes parámetros entre los que destacan pH, conductividad eléctrica, azufre en cortezas de diferentes especies tanto caducifolias (Skye, 1968; Grodzinska, 1979) y perennes (Stânxiang, 1969; Grodzinska, 1971; Lötschert 1977; Raunema, *et al*, 1987). Demostrando su sensibilidad y relación que presentan entre los contaminantes atmosféricos y sus niveles de depósito.

Los sulfatos, cloruros y nitratos son las formas del depósito atmosférico, cuyos efectos son adversos para especies de coníferas en particular de géneros

*Pinus*, *Abies*, *Picea* como los han demostrado diversos estudios a nivel internacional (Grodzinska, 1971; Swiemboda y Kalemba, 1973; Härtel, 1982; Hutchinson 1983; Boarman, 1985; Raunema, *et al*, 1987; Neumann, 1993; Santamaría y Martin, 1997).

En este campo, en México, Báez establece la presencia del fenómeno por depósito ácido en 1984, coincidiendo con el estudio de Alvarado y Bauer (1993) sobre el decline forestal en Desierto de los Leones (DDLL), establece que la plaga de gusano barrenador presente en el lugar no es causante de dicho fenómeno, sino a una serie de factores entre ellos la severa contaminación atmosférica proveniente en la Ciudad de México.

Lo anterior cobra mayor importancia al perderse a un ritmo de 6% anual de bosques en el Valle de México, lo cual repercute en fenómenos como el desfaseamiento de las estaciones del año, recarga de mantos freáticos, mayor contaminación y menos zonas verdes para recreación de la población que vive en la Ciudad de México y su área metropolitana (Excurra, 1992). Así, al estar constituidos los bosques del Valle de México principalmente por coníferas de los géneros *Abies* (Luna en 1997 reporta una disminución de la cobertura del oyamel de hasta un 50% en DDLL), *Pinus* y *Cupressus*, cobra mayor importancia la caracterización de la Depositación ácida.

En el presente estudio se determinan tres iones acidificantes, de los cuales solo sulfatos y nitratos se tiene reportes anteriores. Cloruros por su parte existe poca información de sus concentraciones en la atmósfera en la Ciudad como formas de depósito de ácido (clorhídrico, sulfúrico y nítrico, ozono, entre otros), por medio de un biomonitor el cual es corteza arbórea de tres especies perennifolias (*Abies religiosa*, *Pinus montezumae* y *Cupressus lindleyii*).

## II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los registros ácidos en la atmósfera de la ciudad de México fueron realizados en el Centro de Ciencias de la Atmósfera por Páramo, *et al* (1977) en tres localidades del Distrito Federal, el pH en el agua de lluvia (Cuadro 1) nos da una perspectiva real del fenómeno, que durante mucho tiempo se negó, dando como resultado:

**Cuadro 1: Registro de la precipitación ácida en diferentes delegaciones de la Ciudad de México.**

Lugar	pH min.	$\mu\text{eq} [\text{H}^+]$	pH máx.	$\mu\text{eq}[\text{H}^+]$
Tezozomoc	3.45	354.813	7.65	0.02238
Chapultepec	3.81	154.881	7.63	0.02344
Coyoacán	3.38	416.869	7.27	0.05370
Tlalpan	3.56	275.422	7.79	0.01621
Aculco	2.85	1412.53	7.76	0.01737
PIDS	3.44	363.078	7.89	0.01288
Centro	4.15	70.7945	8.42	0.00380
Contreras	2.66	2187.61	7.11	0.07762
Xochimilco	3.84	144.543	7.54	0.02884

En 1984, el Laboratorio de Química Atmosférica del Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM) confirma que la lluvia ácida está perfectamente establecida en el Valle de México (Báez, 1989), sus efectos no se han sentido como en otros países debido al fuerte contenido de sustancias alcalinas en los suelos y la emisión de fabricas de cemento, cerámica, cal y yeso, que contribuyen a la neutralización de la acidez en la atmósfera.

Lo anterior trajo como consecuencia la necesidad de caracterizar la atmósfera de la ciudad, tomando para este fin el agua de lluvia (rain out) como monitor, encontrando como componentes principales los sulfatos (31.5%) y amonio (27.4%). También se reportan 220  $\mu\text{eq}/\text{l}$  (10.56  $\mu\text{g}/\text{g}$ ) de sulfato, siendo alto a comparación de lo reportado por Likens y Boarmann (1973) en el noreste de Estados Unidos con 60.42  $\mu\text{eq}/\text{l}$  (2.9  $\mu\text{g}/\text{g}$ ). Así como una fuerte correlación entra calcio:sulfato (0.738) magnesio:sulfato (0.627) y calcio:hídronios (0.516) (Báez y Belmont, 1987). Báez, Belmont y Padilla (1996) encuentran que la composición química de la atmósfera de la ciudad varía de

acuerdo a los fenómenos meteorológicos y las diferencias en condiciones de la misma, con respecto a la estacionalidad del año (Figura 1).

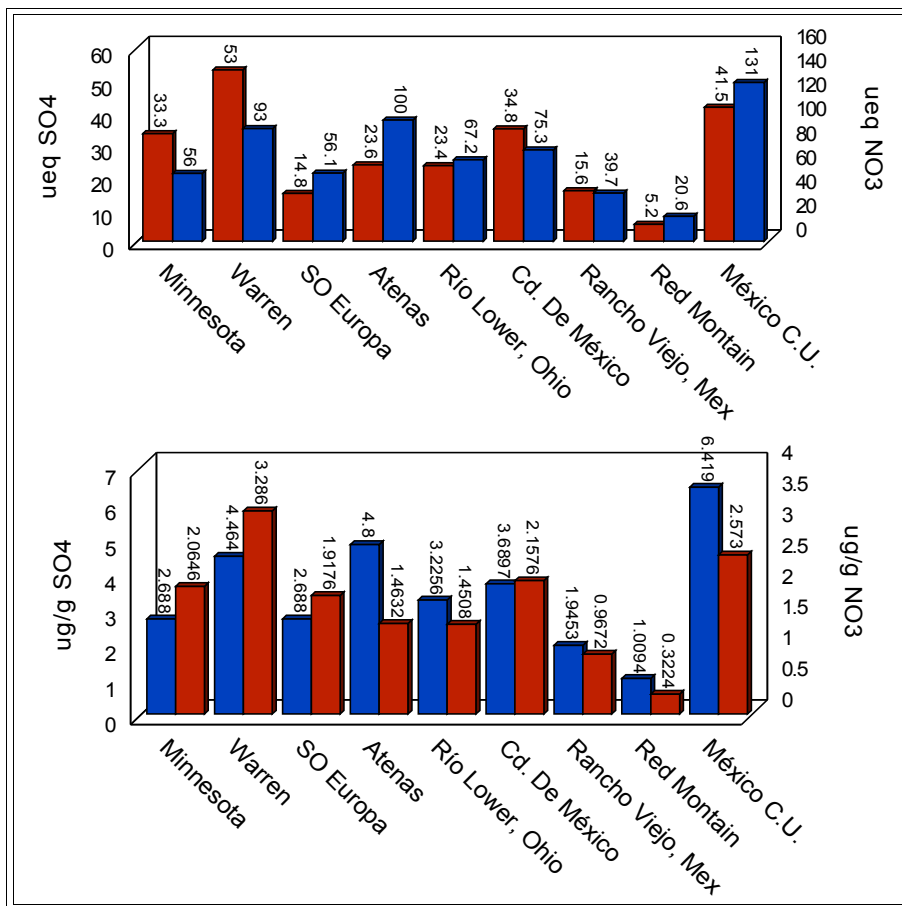


Figura 1. Concentraciones de iones acidificantes reportados en Estados Unidos y Canadá.

En México, Alvarado (1993) realizó una serie de estudios en el DDLL concluyendo que la mortalidad del arbolado (decline forestal) presente en dicho parque, desde 1982, pero no atribuible a la plaga de gusano barrenador en la zona, sino a la convergencia de una serie de factores estresantes al bosque como la contaminación atmosférica proveniente de la Ciudad de México. Esto último corrobora la presencia de la depositación ácida y sus implicaciones de daño al bosque de la Cuenca del Valle de México, que están constituidos principalmente por coníferas, que han sido reportados por diversos autores como especies sensibles al depósito ácido.



**Figura 2. Muerte del oyamel en Desierto de los Leones (1984) fotografía tomada por William M. Ciesla del programa The Bugwood Network and USDA Forest Service. Universidad de Georgia (2006)**

En el presente estudio se determinan tres iones acidificantes, de los cuales solo sulfatos y nitratos se tiene reportes anteriores. Cloruros por su parte existe poca información de sus concentraciones en la atmósfera en la Ciudad como formas de depósito de ácidos clorhídrico, sulfúrico y nítrico, ozono, entre otros, por medio de un biomonitor el cual es corteza arbórea de tres especies perennifolias (Abeto, Cedro blanco y Pino).



### III. OBJETIVOS

---

#### **3.1 General**

Caracterizar sulfatos, cloruros y nitratos del escurrimiento de fuste en árboles perennes (stemflow) de la deposición ácida en los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

#### **3.2 Particulares**

a. Determinar la magnitud del depósito ( $\text{SO}_4$ , Cl y  $\text{NO}_3$ ), bajo los criterios de zona, temporada y especie, en *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae* de los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

b. Cuantificar sulfatos, cloruros, y nitratos de extractos acuosos de corteza arbórea de *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae* de los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

c. Evaluar los indicadores del impacto del depósito ácido (C.E.,  $[\text{H}^+]$  y pH), bajo los criterios de zona, temporada y especie, en *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae* de los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

d. Cuantificar la acidez (pH), hidrónios ( $\text{H}^+$ ) y conductividad eléctrica (C.E) de extractos acuosos de corteza arbórea en *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae* de los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

e. Establecer la relación entre los diferentes iones y parámetros básicos para la especie, zona y temporada para determinar el grado de afectación por el depósito ácido en ambas zonas.

## V. HIPOTESIS

---

A mayor depósito de sulfatos, cloruros y nitratos en los extractos de la corteza corresponderá un incremento de la acidez en los mismos. Estos variarán de acuerdo a la temporada, la zona y a la especie.

La concentración de los iones  $\text{SO}_4$ ,  $\text{Cl}$  y  $\text{NO}_3$ , variará de acuerdo al grado de exposición y cercanía a la Ciudad de México, así como a los factores meteorológicos presentes en el Valle.

La cuantificación de los iones (sulfatos, cloruros y nitratos) y parámetros básicos (conductividad eléctrica, iones hidronio y pH) en corteza arbórea son una herramienta útil para establecer el grado de depósito ácido y su impacto en los ecosistemas de *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae* de los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl.

## V. MARCO TEORICO

### 5.1 Ecosistemas y el depósito ácido atmosférico

El fenómeno del depósito ácido comenzó a finales de los años 60's y principio de los 70's, en dos regiones del continente americano y en la parte Norte y Centro de Europa. Las primeras evidencias de la acidificación de los lagos de Escandinava, Suecia, Finlandia y Dinamarca por efecto de las altas emisiones de azufre y nitrógeno. En los lagos de Canadá y EE UU, al igual de los bosques del Anderodask (California). Dicho fenómeno que se presentaría después en los bosques de Alemania, Checoslovaquia, Hungría, Polonia, Austria, Francia y Suiza, entre otros.

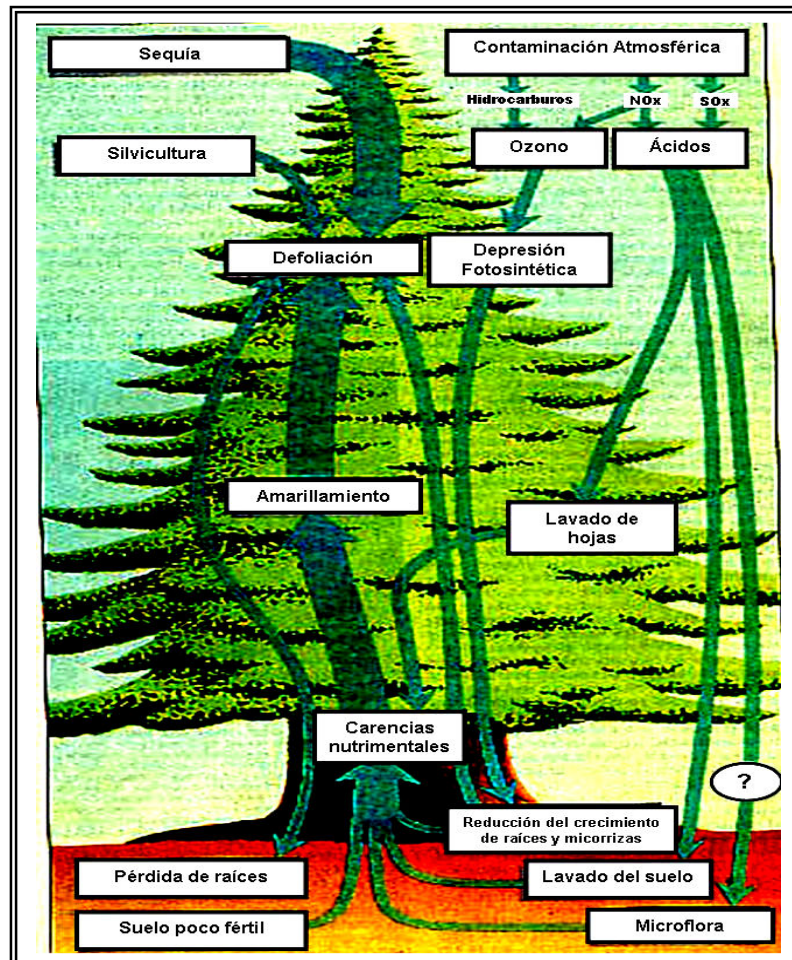


Figura 3: Efectos de la contaminación atmosférica al árbol.

A partir de 1962, se realizan diversos estudios mesoregionales para determinar en forma espacial como temporal la precipitación ácida en Europa (Oden, 1968, 1976; Granat, 1972) tomando como punto de partida la composición y después concentraciones de diferentes iones como sulfatos, óxidos de nitrógeno, entre otros:

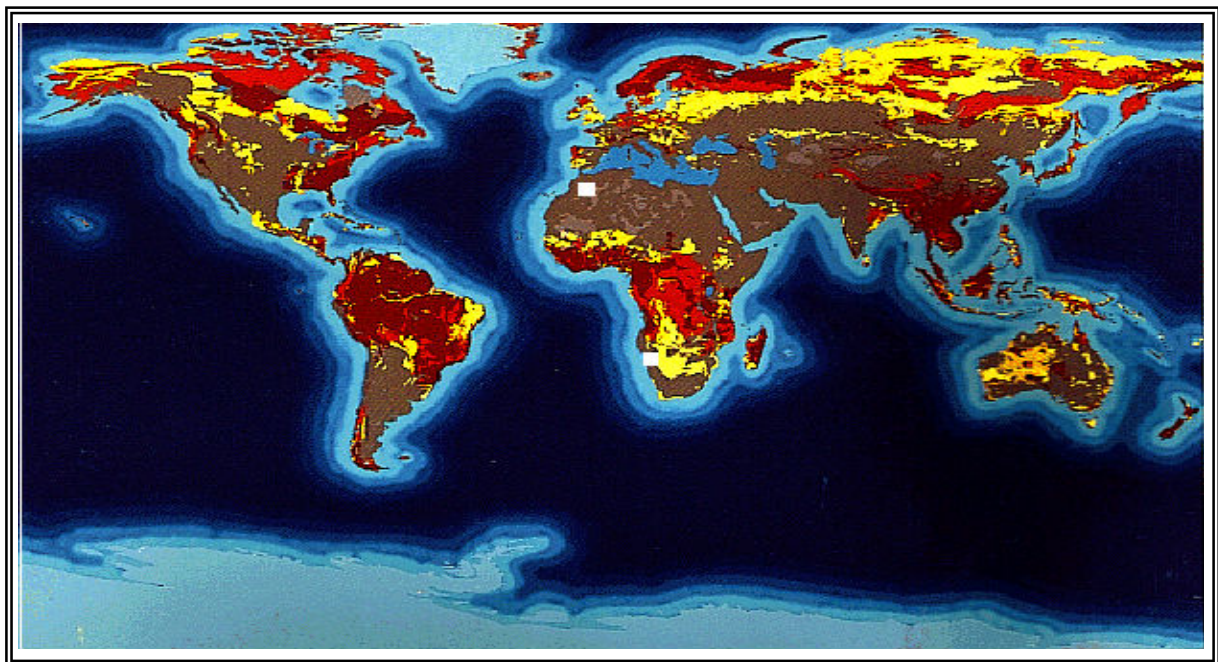
**Cuadro 2. Programas de Investigación creados para el Estudio de Incidencia de Contaminación Atmosférica y Depositación Ácida** (Bonneau y Landman, 1989; Howell 1990; Rodhe y Herrera, en Calva, 1999)

PAIS	NOMBRE DEL PROGRAMA	PROYECTOS	AÑOS
Francia	Depérisement des Forest atribué a la Polluición Atmosphérique (DEFORPA)	50	1983-1985
Países Bajos	Ducth Priority Programme on Acidification (DPPA)	Por país	1976-?
R. F. A.	Ministerio de Investigación Agricultura y Medio Ambiente	400	1970-?
Austria	Forsching sinitiative gengen Waldsterbern		1970-?
Suiza	Programa Nacional de Investigación sobre la Contaminación del aire en Suiza (SANASILVA)		1970-?
Finlandia	Programa H.A.P.R.O.	50	1979
G. B.	European Air Chemistry Network		1950-1996
Suecia	Stockholm Enviromental Institute (S.E.I.)		1990
Europa	Comisión de Comunidades Europeas (C.C.E.)	Suecia, Noruega y Gran Bretaña	1970s
Europa	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (O.C.D.E.)		1979
Europa	International Programme of the United Nations Economic Comission for Europe (U.N.E.C.)		1990
Europa	Agency European Monitoring and Eévaluation Programme (EMEP)		1990
USA	National Atmospheric Deposition Program (N.A.D.P.)		1990
USA	National Acid Precipitation Assessment Program of Environmental Protection Agency (N.A.P.A.P.)		1990
USA	National Aeronautic Space Agency (NASA.)		1990
USA	Global Trens Network		1990
Canadá	Processing of Emision by Clouds and Precipitation		1972
Canadá	Forestry Research Commitee		1989
Canadá	Forestry Research Commitee		1994
Canadá	Forestry Canada's Acid Rain National Early Warning Systems (ARNEWS)		1985
México	Programa de Precipitaciones Acidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México		1993

Es hasta los años 80's es cuando se empiezan a realizar estudios de carácter ecológico, para evaluar el impacto de la depósito ácido en los bosques (Boarmann,

1982; Cowling and Schütt, 1985). Así como el estudio de otros fenómenos relacionados con la contaminación atmosférica, tales como: adelgazamiento de la capa de ozono, emisión de gases y aerosoles de efecto de invernadero e incremento de la temperatura; se sistematizan para determinar llegar al entendimiento de su impacto en los ecosistemas. De ahí la importancia de la integración de los estudios químicos y ambientales con los ecológicos-forestales en áreas cercanas a grandes centros industriales como la Selva negra en Alemania, coinciden con la mortalidad masiva (Decline forestal o Waldsterben) en dichas áreas, dando origen a la creación de programas de evaluación de la deposito ácida a nivel global (Tamm, 1950).

En 1985, el Instituto sueco del Ambiente (Stockholm Enviromental Institute) establece el primer programa de monitoreo de la depositación ácida a nivel global sobresaliendo los ecosistemas húmedos (templados y tropicales) presentes en Latinoamérica (Figura 6) como sensibles a dicho deposito (Kuylensterne, *et al*, 1995).



**Figura 4: Mapa de sensibilidad de los ecosistemas al depósito ácido, el color rojo indica la mayor sensibilidad y café de menor sensibilidad (Kuylensterne, *et al*, 1995).**

Pérez (1997) reporta en Villa del Carbón comportamientos similares en relación entre pH respecto a lo publicado por Krugy e Issacson (1984), la materia orgánica de 6.85 a 15.83%, pH de 5.0-6.5 y la C.I.C. 18.3 a 21.5  $\mu\text{eq}/100\text{g}$  de suelo, concluyó que son suelos susceptibles a la depósito ácido (Cuadro 3), lo cual estaría en correspondencia a lo determinado en Europa por la clasificación de Kuylestierna, *et al* (1995).

**Cuadro 3: Sensibilidad de los tipos de suelo de acuerdo a su capacidad de amortiguamiento (Kuylensterna, *et al*, 1995).**

Sensibilidad	pH	C.I.C. ( $\mu\text{eq}/100\text{g}$ suelo)
1	< 4.0	<10
2	4.0- 5.5	10 a 20
3	5.5- 7.2	20 a 50
4	>7.2	>50

## 5.2 Consecuencias de la Depositación Ácida en los Bosques

El efecto directo del depósito no explica por sí mismo el fenómeno de mortalidad masiva del arbolado en diferentes partes del mundo, llamado decline forestal. Por lo cual, se establecen varias hipótesis para tratar de explicar dicho fenómeno (Schütt and Cowling, 1985).

- **Toxicidad de Aluminio por Acidificación.** La acidificación natural de los suelos forestales (desintegración del humus, nitrificación y la mayor toma de cationes que aniones del suelo) es acelerada en forma directa o indirecta como resultado de la depositación, de sustancias ácidas o acidificantes de la atmósfera, incrementando considerablemente la acidez del suelo y la solubilidad del ion aluminio en el mismo (Ulrich, Mayer y Khana, 1979), (por efecto de la depositación de  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{Cl}^-$ ).
- **Daño por ozono.** Las altas concentraciones de ozono que se ve sometido el arbolado, causan una serie de daños como decoloración con pérdida de

la masa foliar, senescencia prematura de las hojas y susceptibilidad al ataque de organismos patógenos en hojas y raíces (Prinz in Schütt and Cowling, 1985), debido a la absorción vía seca del ozono que daña la estructura intracelular y como consecuencia la inmunodepresión del árbol.

- **Estrés General.** La contaminación atmosférica ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{Cl}^-$ , entre otros) asociada con la depósito del mismo tipo de nutrientes, sustancias alteradoras del crecimiento y tóxicas en los años recientes han disminuido la tasa fotosintética con la consecuente pérdida de carbohidratos y el aumento de metabolitos de tipo secundario potencialmente tóxicos. Así como la acumulación de sustancias tóxicas en las raíces que mata las raíces secundarias, altera las relaciones simbióticas y hospedero-parásito (Tamm and Cowling, 1977). Debido al rompimiento del ciclo de dormancia del arbolado produce un inmunodepresión y alteración en el metabolismo del mismo.
- **Deficiencia de Magnesio.** La depositación ácida contribuye a las alteraciones de crecimiento al ser lixiviado el magnesio intracelular durante el stemflow, en presencia de abundante de nitrógeno y calcio que se ve posiblemente acelerado por el ozono epizoico o el daño de las cutículas y membranas celulares (Rehfuss, 1983), al también depositarse los aerosoles de ácidos minerales o sus precursores los cuales entran por los estomas y reaccionan dentro de las hojas.
- **Exceso de Nutrientes o Nitrógeno.** El nitrógeno es uno de los elementos que más limita la productividad de los bosques, las emisiones de los compuestos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) se han incrementado en años recientes causando: a) Incremento en la tasa de crecimiento, demandado mayor cantidad de elementos esenciales, que al no estar disponibles causan una deficiencia de los mismos; b) Inhibición o necrosis de las micorrizas; c) Mayor susceptibilidad a heladas (al no entrar el árbol en dormancia) y menor cuticularización de la epidermis; d) Incremento de la susceptibilidad al ataque de patógenos; e) Cambios en los radios de las

raíces; f) Alteraciones en los procesos de nitrificación, desnitrificación y fijación del mismo.

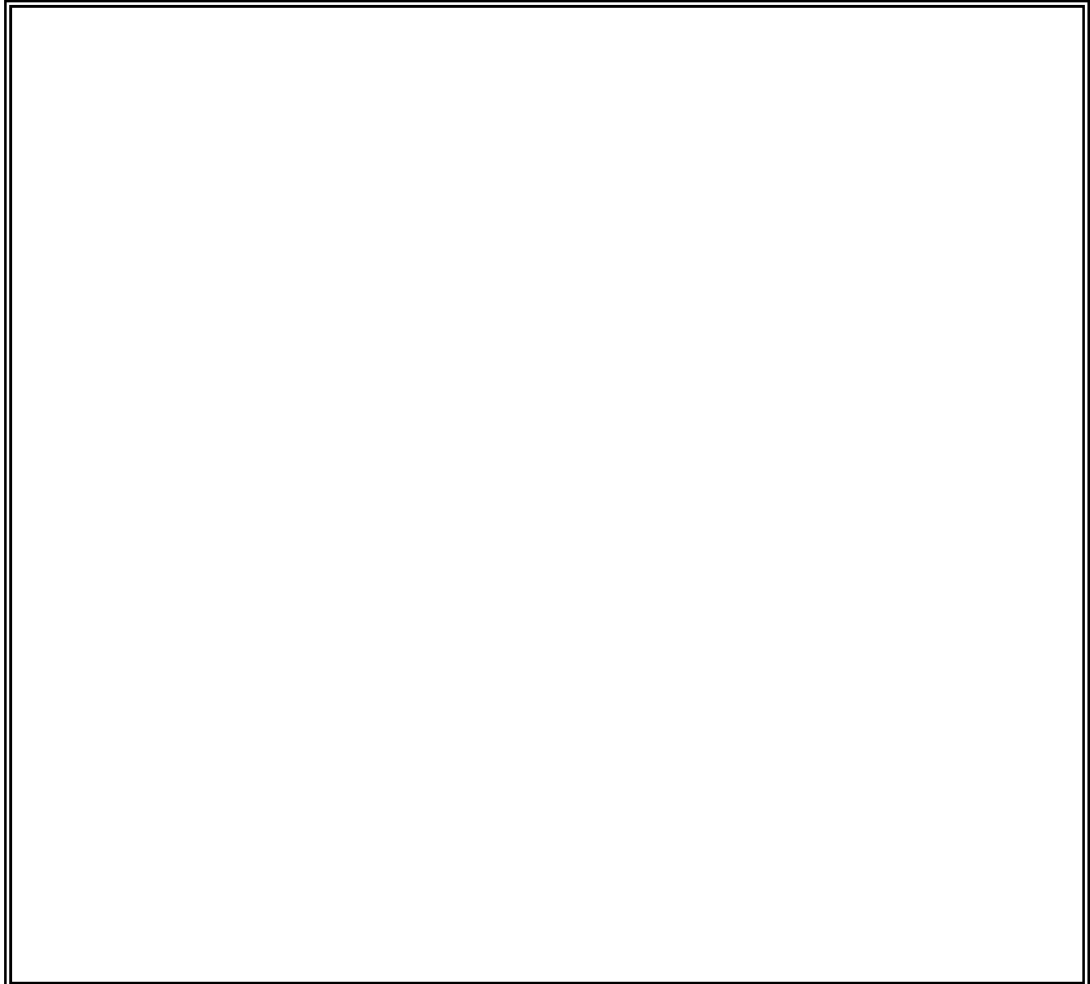


Figura 5. Hipótesis de las muertes masivas

- **Transporte Aéreo de Sustancias Alteradoras del Crecimiento.** Los contaminantes atmosféricos afectan el balance normal de los reguladores del crecimiento de los árboles provocando abscisión temprana de las hojas y su deformación, generación de raíces adventicias y alteración en la distribución del fotosintato; a partir de la alta demanda de nutrimentos y rompimiento en el ciclo de dormancia.

A principios de lo años 80's comienzan los primeros estudios de carácter ecológico con el objetivo de evaluar con mayor precisión los efectos de la depositación ácida en



ecosistemas boscosos, así determina Boarman (1982) las diferentes etapas del decline forestal (Cuadro 4), pero todavía no se asocian con el grado de depósito de los contaminantes atmosféricos (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y Cl<sup>-</sup>, entre otros).

**Cuadro 4: Etapas del Decline Forestal debido al Estrés por Contaminación del Aire (Boarmann, 1982).**

Estado	Nivel de Contaminación Antropogénica	Impacto en el Ecosistema	Efectos Ecológicos Espaciales
0	Insignificante	Ninguno	Ninguno
I	Bajos Niveles	Relativamente no afectado	El ecosistema sirve como depósito de los contaminantes
II A	Niveles iniciales para organismos sensibles	De continuar posibles cambios importantes en la viabilidad competitiva de especies sensibles	Reducción de fotosíntesis, cambios en la capacidad reproductora, en la vulnerabilidad al ataque de insectos y hongos, efectos deletéreos en los ciclos de nutrientes
II B	Incrementa el estrés por contaminación	Sustitución de especies resistentes por sensibles	Pérdida de especies sensibles, ataque de organismos patógenos como efectos secundarios, polinización no viable, muerte de animales sensibles
III A	Niveles severos de contaminación	Cambios a gran escala en el sistema original	Plantas superiores, arbustos y árboles mueren por altas concentraciones acumuladas de contaminantes y limitan el desarrollo de muchas especies. Viabilidad de regulación de los ciclos biogeoquímicos disminuida
III B	Altos niveles de contaminación	Ecosistema completamente degradado	Ecosistema colapsado

### **5.3 La captación del Depósito ácido atmosférico**

La ruta de incorporación de los contaminantes a la superficie terrestre. Lo podemos expresar en tres grandes procesos:

- **Lavado Total** (Net throughfall). En este proceso se considera la captación del depósito que al caer lava los constituyentes de la atmósfera así como otros elementos de los diferentes materiales que se encuentra en el camino como pueden ser la copa de los árboles, paredes de edificios que finalmente se depositan en el suelo.

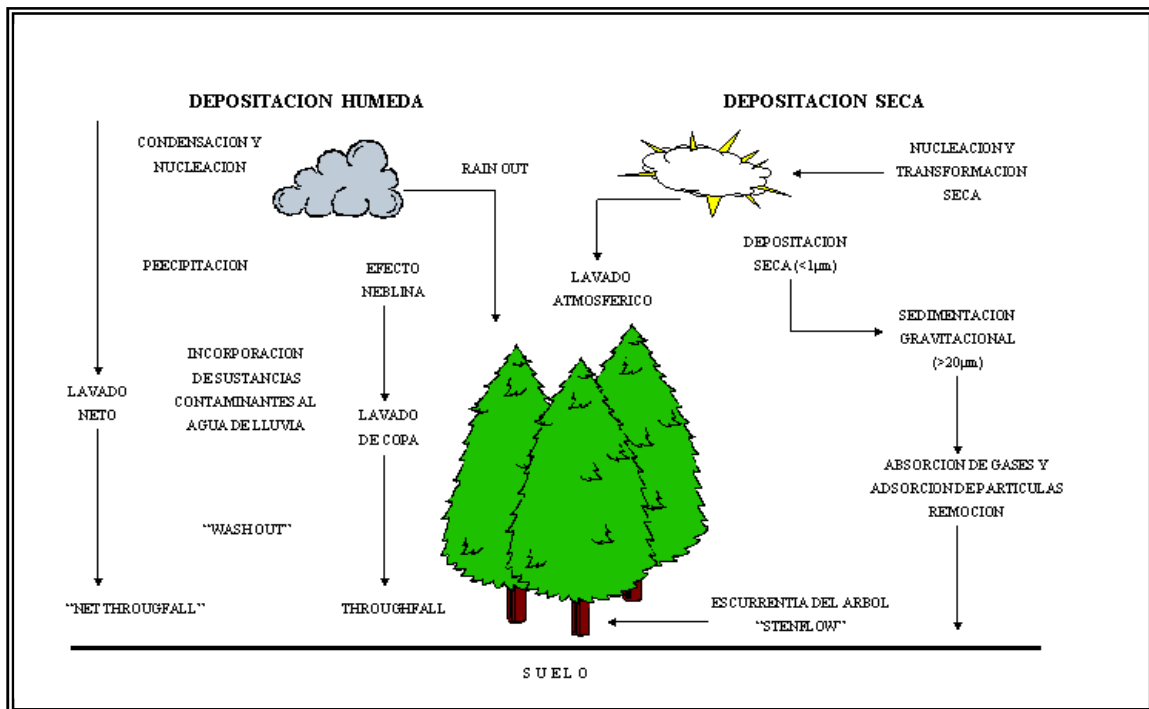


Figura 6. Contaminantes Atmosféricos vs. Mecanismos de incorporación (Tomado de Calva, 1999)

- **Lavado de Copa (Throughfall).** Es el lavado de micro y macronutrientes que sufre la vegetación por efecto del depósito ácido, al reaccionar con los constituyentes naturales, lava elementos como Mg, Na, Fe, Si, entre otros. provocando pérdida del follaje, clorosis, entre otros. Este depósito se realiza principalmente en las hojas y ramas (Figura 6).
- **Lavado del fuste (Stemflow).** Después de entrar en contacto con el follaje, la partícula contaminante viaja hacia el tronco o tallo donde comienza un nuevo lavado al reaccionar con ellos, en el caso de la corteza arbórea se incorpora por vía húmeda o se adsorbe a la misma en espera de condiciones húmedas para su incorporación (Figura 6).

Durante estos procesos los contaminantes van interactuando con los constituyentes del dosel originando un intercambio iónico donde los nutrientes se ven desplazados por elementos del depósito como sulfatos, cloruros, hidrónios, nitratos que al presentarse el stemflow se deposita en la corteza.

Evans, et al (1981) describe el impacto en los ecosistemas forestales debido a la depositación ácida que van desde daño en el follaje, disminución de la tasa fotosintética, alteración de los ciclos biogeoquímicos en el ecosistema. Que se refleja en la pérdida de cationes, aumento de la acidez del suelo por el aporte de S en forma  $\text{SO}_x$  (90%) y de N en forma de  $\text{NO}_x$ , amonio (56%) de origen antrópico.

Por otro lado, la lixiviación de las sustancias ácidas depositadas en el follaje, tronco y corteza, alteran el equilibrio iónico y propiedades del mismo, provocando una rápida aceleración en el proceso de protonización del suelo, provocando que el aluminio se solubilice con un pH menor de 4.5 ( $>31.62 \mu\text{eq} [\text{H}^+]$ ) siendo captado por las plantas donde es sumamente tóxico.

#### ***5.4 Síntesis atmosférica de los ácidos***

Son varios los grupos químicos que se involucran en la formación de los ácidos atmosféricos, así los contaminantes primarios se involucran directamente de su emisión con el vapor de agua de la evapotranspiración. Las partículas de materia suspendidas totales (PST), juegan en sus diversos tamaños son los conformantes de las atmósferas contaminadas en las grandes ciudades, contribuyen a fenómenos como la disminución de la visibilidad etc. Al combinarse con los constituyentes naturales de la atmósfera y las condiciones meteorológicas cambian la acidez natural de agua de lluvia.

La acidez del agua de lluvia (Figura 7) es el resultado de la disolución del  $\text{H}_2\text{CO}_3$  (gas), la reacción de los gases de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  en el vapor de agua de la atmósfera ( $\text{pH} \leq 5.5$ ). En el laboratorio se produce al tener 300 ppm de  $\text{CO}_2$  en equilibrio con agua destilada.

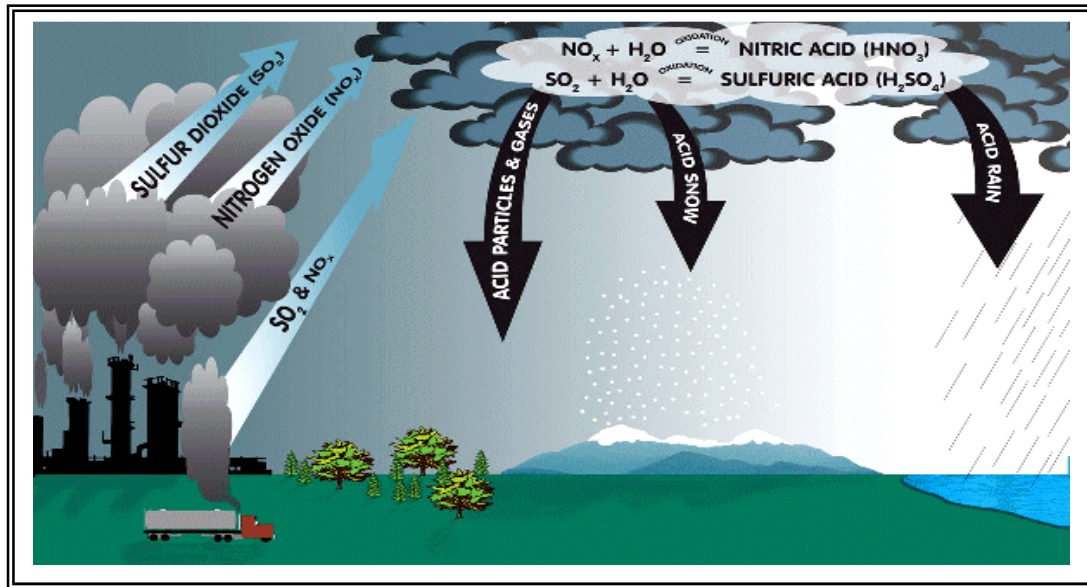


Figura 7. Formación del depósito ácido atmosférico a partir de las emisiones de azufre y nitrógeno.

El depósito ácido contiene diversos grupos de iones de tipo orgánico e inorgánico (Cuadro 5), entre los más importante se encuentran:

Cuadro 5: Grupos de iones orgánicos e inorgánicos contemplados dentro del depósito ácido

Orgánicos		Inorgánicos	
<i>Acidos carboxílicos</i>	<i>Aldehidos</i>	<i>Acido clorhídrico</i>	<i>Acido sulfúrico</i>
<i>Eteres</i>	<i>Esteres</i>	<i>Acido nítrico</i>	<i>Acido sulfhídrico</i>
<i>Alcoholes</i>	<i>Fenoles</i>	<i>Amonio</i>	<i>Oxidos de nitrógeno</i>
<i>Aromáticos</i>	<i>Aminas</i>	<i>Oxidos de carbono</i>	<i>Ozono</i>
<i>Iminas</i>	<i>Paracetil nitrógeno</i>	<i>Oxidos de azufre</i>	<i>Sulfatos</i>
		<i>Cloruros</i>	<i>Nitratos</i>

El valor de pH se altera de acuerdo a las condiciones químicas de la atmósfera de cada lugar, en forma mesoregional dependiendo de la cantidad de bases presentes en el ambiente, a la proximidad con el mar, a la reacción de los contaminantes entre ellos y con los elementos constituyentes de la atmósfera (Sequeira, 1981 y 1982).

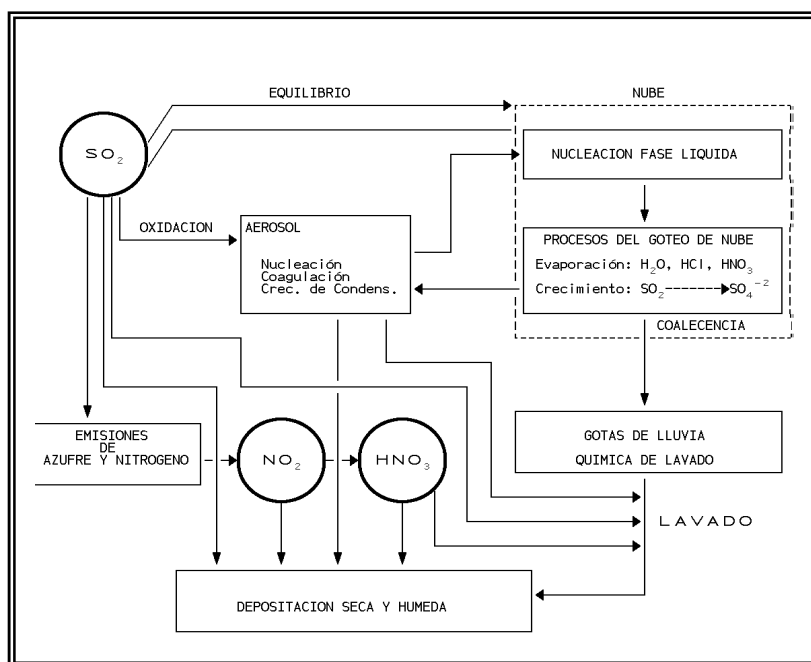


Figura 8. Rutas Atmosféricas que conllevan a la deposición ácida en Calva (1999)

### 5.5 Procesos de Incorporación del depósito ácido

Una vez sintetizados los ácidos atmosféricos son dispersados y se depositan de acuerdo a su tamaño a determinada distancia de la fuente de emisión por gravedad o impactación en diferentes superficies. Así tenemos dos rutas de depósito, se llevan a cabo de acuerdo con las características propias del contaminante (Hutchinson y Havas, 1980; Galloway y Parker, 1980):

- **Vía húmeda.** Es aquella por la cual se deposita el contaminante en presencia de precipitación (lluvia, granizo, rocío, neblina y nieve) o en condiciones húmedas. A través de la absorción del contaminante en forma directa.
- **Vía Seca.** Es la transferencia directa de gases y material particulado desde la atmósfera a la superficie. Por gases y pequeñas partículas (<1µm de diámetro), esta transferencia es afectada por turbulencia dentro de algunos mm de la superficie y por la difusión molecular así como Browniana. Las grandes partículas se depositan por sedimentación bajo la influencia de la gravedad o en el caso de los gases es por absorción de gases como el SO<sub>2</sub> a través de

superficies húmedas del follaje, corteza, estomas, paredes y estructuras protectoras (Saavedra, 1996). En la segunda etapa se absorbe incorporándose a la estructura vegetal

## **5.7 Fuentes de contaminantes atmosféricos**

En la atmósfera se llevan acabo diversos procesos de regulación y purificación del aire, en ella se vierten diferentes sustancias que alteran la composición natural de la misma, estas fuentes de emisión se clasifican en:

- **Fuentes Fijas.** La quema de diferentes combustibles para el funcionamiento de plantas industriales y en hogares, generan gases, humos y material particulado rico en sustancias como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  e  $\text{HC}_x$ , al presentar combustiones incompletas y falta de oxígeno aportan grandes cantidades de contaminantes a la atmósfera. En esta categoría se consideran a las industrias, casas y depósitos de desperdicios que emiten a la atmósfera. En los campos agrícolas la generación de aerosoles y material particulado debido a la fertilización, así como la utilización de compuestos organoclorados (WNO, 1968).
- **Fuentes Móviles.** Son todas aquellas fuentes que se desplazan por medio de motores de combustión interna, cuya eficiencia es baja al estar diseñados para su utilización en alturas diferentes a la ZMCM, así con un parque vehicular creciente y viejo contribuyen sustancialmente a la emisión de los diferentes contaminantes.
- **Fuentes Naturales.** Los contaminantes naturales son gases y material particulado. Polvos de pantanos, cenizas de incendios forestales, partículas de sales marinas, polen y residuos finos de erupciones volcánicas constituyen la gran mayoría del material particulado flotante en la atmósfera. Las impurezas gaseosas en la atmósfera como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$  y  $\text{H}_2\text{S}$  son de origen volcánico y/o bacterias sulfurosas presentes en zonas pantanosas, la formación de otros gases como  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  a las descargas eléctricas durante las tormentas (WMO, 1968).

## 5.8 Química de la depositación

El depósito ácido presenta una variada y compleja química en la que intervienen factores como:

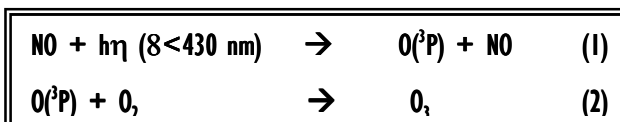
- Características geográficas<sup>1</sup>. Están determinadas por la altitud, latitud, longitud, orografía, cercanía con el mar, disponibilidad de oxígeno, rosa de vientos.
- Características climáticas<sup>2</sup>. Están determinadas por el régimen de precipitación, temperatura, incidencia de luz solar, humedad relativa, entre otros.

Por lo anterior, la química atmosférica varía en cada lugar presentando características únicas, por lo tanto se deben de tener en consideración en la caracterización química del depósito ácido.

En el Valle de México la atmósfera se caracteriza por ser oxidativa (Fenn et al, 1997; PPAZMCM, 1994), con frecuentes inversiones térmicas, la presencia recurrente de la isla de calor y efecto de domo; debido a las escasas áreas verdes, una gran superficie pavimentada o recubierta por concreto, a la alta emisión de gases de invernadero ( $\text{CO}_x$ ,  $\text{HC}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,) así como una gran cantidad de material particulado presente en la atmósfera. Bajo las anteriores condiciones los procesos en la atmósfera son en su mayoría fotoquímicos, al tener un ambiente rico en energía y estacionario durante una buena parte del año produciendo un gran número de reacciones que dan como resultado sustancias ácidas o potencialmente ácidas como:

### a) Formación de Ácido Nítrico y Sulfúrico

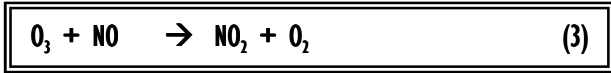
En esta fase se generan diferentes sustancias como el ácido sulfúrico, nítrico, ozono e hidrocarburos a partir de contaminantes primarios:



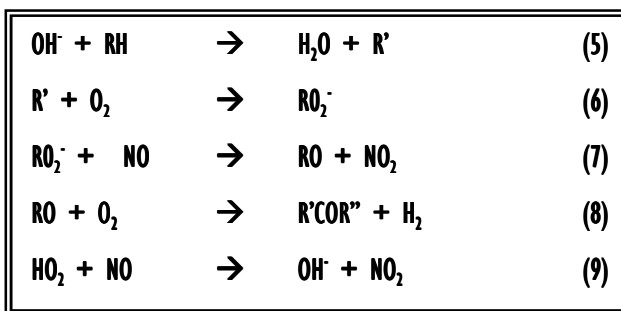
<sup>1</sup> Factores que determinan la dispersión y concentración de los contaminantes (WMO, 1968)

<sup>2</sup> Factores que inciden en la formación-reacción de los contaminantes entre sí y/o constituyentes de la atmósfera (WMO, 1968)

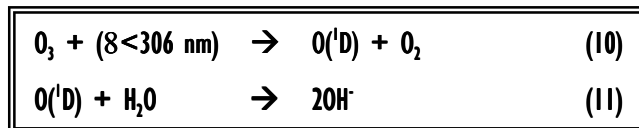
Se elimina en parte por la reacción con NO para formar nuevamente NO<sub>2</sub>:



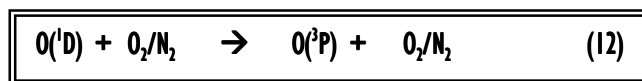
El ciclo de reacciones 1 a 3 ocurre durante el día, permitiendo una concentración de ozono que crece con la intensidad de la luz solar, la relación [NO<sub>2</sub>]/[NO] se incrementa simultáneamente al pasar el NO a NO<sub>2</sub> mediante las reacciones 5-9 involucrando al OH<sup>·</sup>, HO<sub>2</sub><sup>·</sup> y al radical peroxi (RO<sub>2</sub><sup>·</sup>) formado de los hidrocarburos y productos de oxidación como aldehídos y monóxido de carbono.



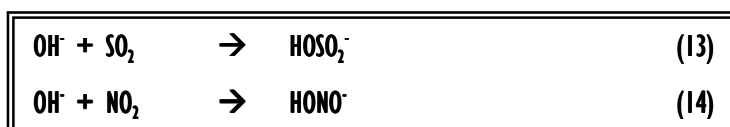
El radical hidróxi (OH<sup>·</sup>) que inicia la secuencia de reacciones es formado principalmente a través de la fotodescomposición de ozono (Reacciones 10-11):



La concentración del radical OH<sup>·</sup> en la troposfera es una función compleja de la concentración y naturaleza de los hidrocarburos presentes, [NO], [NO<sub>2</sub>], humedad, intensidad de radiación solar en longitud de onda <306 nm (Reacción 12):

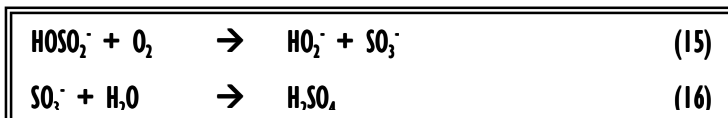


Las reacciones de los radicales libres OH<sup>·</sup> con SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> son considerando las mas importantes en fase gaseosa como fuentes de ácido sulfúrico y nítrico respectivamente (Reacciones 13-14)

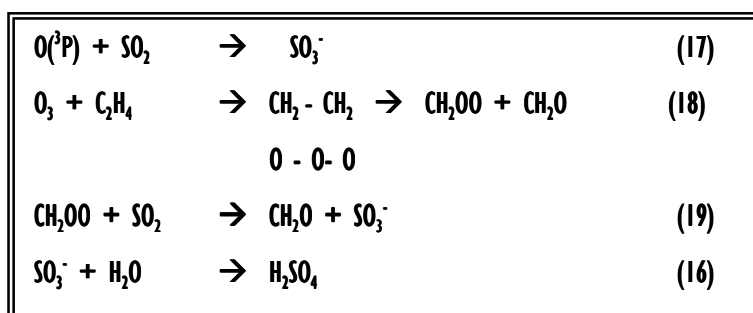




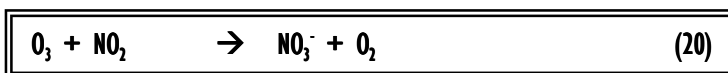
Y al ser la ruta de formación de ácido sulfúrico como producto del ion  $\text{HOSO}_2$  (Reacciones 15-16)



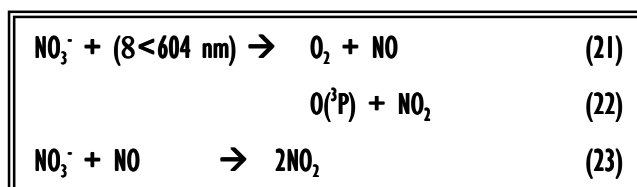
Otros de los mecanismos de oxidación del  $\text{SO}_2$  se presenta con átomos de  $\text{O}(^3\text{P})$  con los intermediarios de Criegee que forma parte de la reacción alqueno-ozono (Reacciones 17-19)



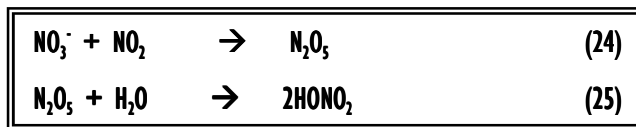
La química troposférica del  $\text{NO}_2$  durante su oxidación en fase gaseosa es mucho más dinámica (aproximadamente 10 veces) que la de  $\text{SO}_2$ , presentándose durante el día, al anochecer esta cadena de reacciones forman el ácido nítrico originado a partir del de la reacción de ozono y  $\text{NO}_2$  (Reacción 20)



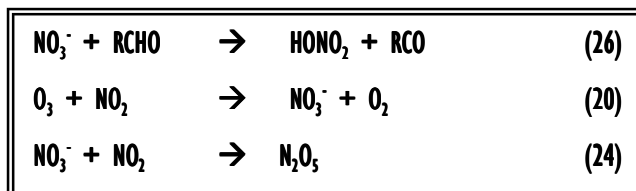
El producto del radical  $\text{NO}_3$  es una fuente no muy importante de ácido nítrico durante el día, debido a fotólisis en presencia de luz solar y su reacción rápida con  $\text{NO}$  (Reacciones 21-23)



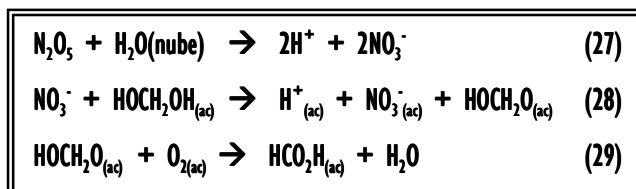
Al pasar las horas e incrementarse la concentración de  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_3$  (en concentraciones equivalentes) se forma el  $\text{N}_2\text{O}_5$ , que en presencia de agua forma ácido nítrico (Reacciones 24-25)



O directamente al reducir los hidrónios de los aldehídos u otros compuestos que sean reactivos (Reacciones 26, 20 y 24)



Las reacciones en fase gaseosa pueden generar ácidos orgánicos por diversos mecanismos. Las reacciones con intermediarios de Criegge son un ejemplo, el vapor de agua o radicales  $\text{HO}^\cdot$  con aldehídos pueden llevar a la formación de ácido acético, fórmico u otros ácidos más complejos. La fracción teórica que está formada por ácidos orgánicos es relativamente grande para las masas de aire troposférica con rangos típicos de contaminantes se espera que entre un 5 a 20% son ácido orgánicos (Reacciones 27-29)



### ***b) Formación de Aerosoles***

La atmósfera terrestre provee una buena matriz para procesos oxidativos y/o fotoquímicos de los contaminantes, que contribuye significativamente a la remoción de los mismos, involucrando la fotólisis, reacciones homogéneas y heterogéneas del material particulado que la fototransformarse remueven sustancias de baja volatilidad, principalmente de los compuestos de nitrógeno reducido (amonio y amoniaco)

Las partículas de nitrógeno reducido, así como las sales minerales (NaCl, NaF) que conforman los aerosoles se dispersan a través de movimiento browniano y siguen el esquema general de formación del sulfato de amonio

## **5.6 La lluvia ácida en México**

De 1968 a la fecha, se han realizado múltiples estudios para la caracterización de la depositación ácida utilizando diferentes monitores para tal fin, entre los que se encuentran el agua de lluvia (Páramo, et al, 1976; Báez and Belmont, 1987; Padilla-Gordon, et al, 1996; Báez, et al, 1997), corteza arbórea de especies perennes y caducas. En México, la investigación en este campo es muy escasa realizándose principalmente en el Centro de Ciencias de la Atmósfera (UNAM) y Colegio de Postgraduados de Montecillos (SAGAR) del depósito húmedo y total (wet y bulk precipitation).

Desde 1988 en el Laboratorio de Contaminación Atmosférica (FES Zaragoza) se estudia el fenómeno de la depositación ácida, evaluando el potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (C.E.), capacidad media de amortiguamiento (C.M.A.) y suelo en Parque Urbanos (Aragón, Chapultepec y Tlalpan) y Periurbanos (Villa del Carbón, Iztapopocatepetl, Zoquiapan y Desierto de los Leones) de la Ciudad de México a través de biomonitores como la corteza arbórea y hojas de especies perennifolias.

En Parques Urbanos, Soto (1996) reporta para *Cupressus lindleyii* una acidez de 2.47-3.05 en Villa de Carbón, 2.90-3.95 en Tlalpan y 2.80-3.60 en Chapultepec. En Desierto de los Leones (DDLL) Saavedra (1996) en la misma especie 4.16-6.94 de pH y en *Abies religiosa* así como *Pinus sp.* reporta valores similares a los publicados por Grodzinska (2.75-3.69), Robitaille y Leblanc (3.3-4.4) para ambas especies respectivamente.

A partir de 1996, se abre la presente línea de investigación de proyecto, esta línea abierta primeramente para evaluar el depósito seco en hojas y posteriormente con corteza arbórea que dan los primeros resultados dentro del proyecto, en el cual se evalúan iones de carácter ácido en parques periurbanos en el Laboratorio de Contaminación Atmosférica.

### **5.9 Características de la corteza**

Se le denomina corteza a los tejidos que quedan por fuera del cambium vascular del eje, tanto en período de crecimiento primario como en el secundario. También se usa más específicamente para designar el tejido que se acumula en la superficie del eje de la planta como resultado de actividad del felógeno. A medida que la peridermis se desarrolla, separa, por medio de las capas de células suberosas, cierta cantidad de tejidos primarios y secundarios del resto de tejidos vivos subyacentes. Las capas de tejido así separadas mueren. Correspondiendo a los tejidos muertos junto con las capas del súber al cual se designa como corteza externa o ritidoma (Figura 9A).

En el ritidoma o corteza externa predominan las células parénquimáticas y las suberosas blandas; pudiendo contener gran cantidad de fibras derivadas generalmente de floema. Las cortezas fibrosas forman un modelo reticular al hendirse (*Cupressus*, *Fraxinus*, *Tilia*); las que carecen de fibras se disgregan en fragmentos escamiformes (*Acer*, *Pinus*, *Abies*). La manera como se originan, las capas sucesivas de peridermis influye directamente en las características del ritidoma. Si la peridermis subsiguientes superpone a manera de escamas, los tejidos externos se separan según unidades afines y la corteza externa que resulta se designa como corteza escamosa (*Pinus*, *Pyrus*). Si por el contrario el felógeno se desarrolla de todo el tallo, se forma una corteza anular que se caracteriza por la separación de cilindros huecos (anillos) de tejido (Figura 9B). Este tipo de corteza externa es frecuente en las plantas en las cuales la primera epidermis se forma en las capas profundas del eje y las peridermis subsiguientes se disponen más o menos concéntricamente de la primera (Cupresáceas,

*Roncera, Clematis, Vitis*). Una corteza escamosa, pero las demás escamas muy grandes (*Platanus*), pueden considerarse como tipo intermedio entre las cortezas escamosas y anular.

La manera según la cual los tejidos muertos se separan del tallo viene también influida por la naturaleza de la peridermis. En algunas plantas la separación tiene lugar a través de las células suberosas de membranas delgadas. En *Platanus* y *Arbutus*, por ejemplo, el tejido muerto se separa de la peridermis en forma de escamas delgadas grandes a partir de la capa externa del súber provisto de membranas delgadas mientras que el tejido suberoso de membranas gruesas subyacente permanece sobre el tallo y tiene una superficie lisa (Figura 9C). El súber de las membranas gruesas se desprende del tallo con las nuevas escamas formadas en el período subsiguiente. El desprendimiento de la corteza externa tiene lugar a veces por medio de la rotura verificada en las células no suberificadas de membranas delgadas del súber (feloides), o bien dentro de las células no parénquimáticas de las partes del tallo que han quedado aisladas por el desarrollo de la peridermis (Chattaway, 1953; Pfeiffer, 1928) (Figura 9D).

En muchas plantas las células peridermáticas muestran considerable cohesión y las sucesivas capas de ritidoma están fuertemente unidas entre sí. La corteza externa es entonces gruesa, con grietas externas más o menos profundas, y se va desgastando gradualmente. Ejemplos de árboles con este tipo de corteza son la *Sequoia sempervirens* (Isenberg, 1943) y ciertas especies de *Quercus*, *Betula*, *Salix*, *Robinia*. El tipo de corteza, la poco compactada y fibrosa, se presenta en ciertas especies de *Eucalyptus* (Chattaway, 1955).

Esta textura resulta de la dilatación del parénquima del floema axial, cuyas células pueden agrandarse hasta hacerse muchas veces mayor que su tamaño original. El parénquima se dilata luego que es separado del tejido subyacente por la peridermis y da lugar a la amplia separación de los haces de fibras característico de las cortezas (Figuras 9E y 9F).

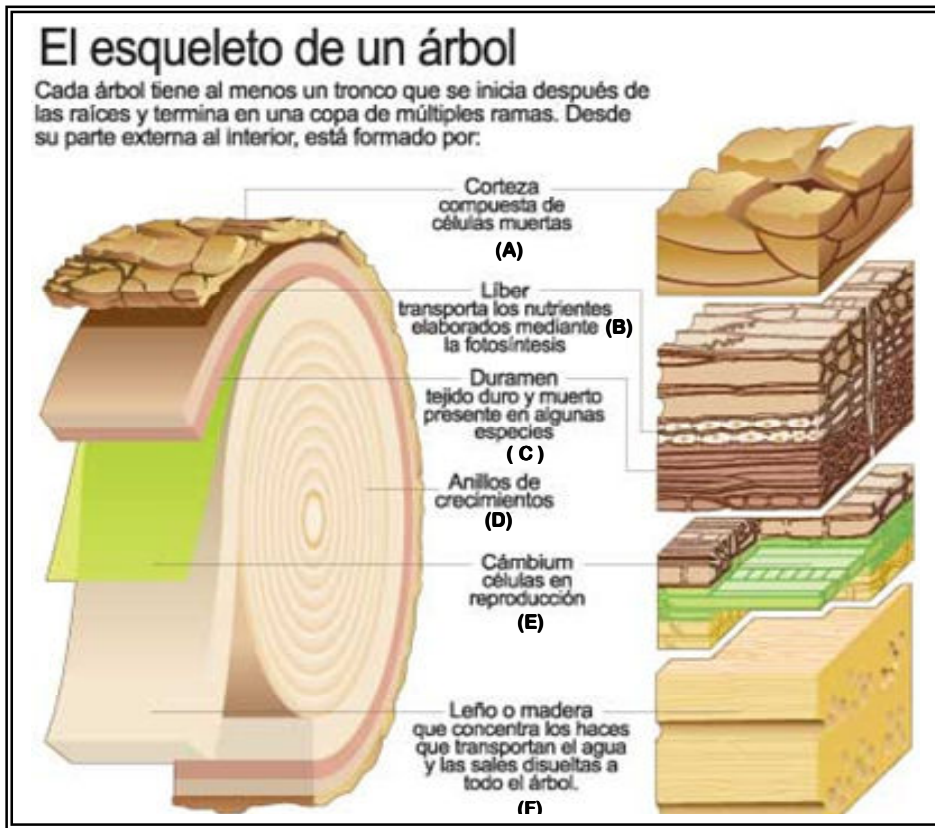


Figura 9. Anatomía del tronco de un árbol

En su composición química, destacan el contenido de lignina (40-55%) que confiere resistente a la pared celular y desempeña como cementante intercelular, de polisacáridos un 30-48%, 20-35% de Celulosa, y un 2 al 5% de minerales. Para coníferas un rasgo característico es la presencia de taninos condensados (proantocianidas y poliflavenoides) (Esau, 1985). La humedad depende de la razón corteza interna-externa pues el contenido de agua varía significativamente en ambas (Esau, 1985).

## VI. DESCRIPCION DE LAS ESPECIES

---

### 6.1 *Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham.



Figura 10. Abeto u Oyamel (*Abies religiosa* (HBK.) Schltdl. et Cham. Foto tomada por Jeff Bisbee (Arboretum de Villardebelle, 2005)

Árbol de 35 a 45 m (hasta 60 m) de altura, con tronco de 1 a 1.80 m de diámetro. Copa cónica. Ramas extendidas o ligeramente ascendentes y verticiladas. Hojas alternas dispuestas en espiral, lineares, derechas o algo falcadas, subdísticas, torcidas en la base, de 20 a 30 mm de largo por 1.5 mm de ancho; ápice agudo y córneo, de color verde oscuro en el haz y glaucas en el envés. Las ramillas son colgantes, comunmente opuestas en forma de cruz. Corteza externa de color café-rojizo, grisácea, con pequeñas placas irregulares, de 1-5 mm de grosor. Planta monoica, con inflorescencias masculinas en las ramillas laterales, oblongas y romas, de 12 a 14 mm de largo por 5 mm de ancho, de color violáceo, al principio protegidas por mucha resina. Las inflorescencias femeninas se desarrollan hacia la cima del árbol, en forma de conillos

subcilíndricos de 7 cm de largo con las brácteas rojizas de margen rasgado, blanco y translúcido, y llevan en el centro una banda longitudinal. Conos solitarios, erguidos, cilíndrico-oblongos, romos, rara vez cortamente oblongos, resinosos, casi sésiles o con pedúnculos de 5 a 9 mm; color violáceo a moreno violáceo con la edad, miden de 10 a 16 cm de largo por 4 a 6 cm de ancho. La edad a la que florece y fructifica oscila entre los 23 y 27 años.

Se encuentra formando bosques entre los 1600 y 3600 msnm, solo o junto con especies de *Pinus* y *Alnus*. Habita zonas de alta humedad principalmente sobre cañadas o exposiciones húmedas y regularmente en suelos profundos.

## **6.2 *Pinus montezumae* Lamb.**



Figura 11. Pino (*Pinus montezumae* Lamb.) Foto tomada por Michael P Frankis (Arboretum de Villardebelle, 2005)

Árbol de 20-30 m de alto. Copa irregularmente redondeada. Hojas en grupos de 5 y ocasionalmente 4, anchamente triangulares, de color verde oscuro, de 14-21 cm de largo, son medianamente gruesas y fuertes, extendidas o colgantes, flexibles, con los

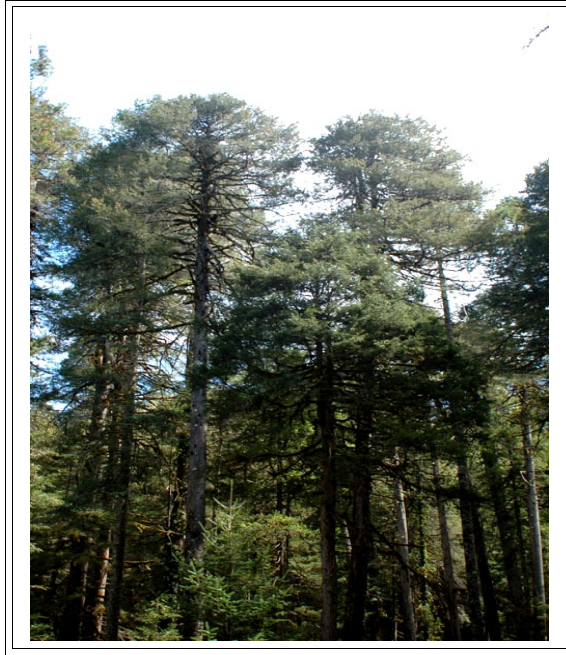


bordes aserrados. Ramas extendidas frecuentemente bajas; ramillas morenas y muy ásperas, con la base de las brácteas persistentes, abultadas y muy aproximadas, que comúnmente se descaman. Corteza moreno rojiza, gruesa, áspera y agrietada. Conos largamente ovoides cónicos u oblongos cónicos; levemente asimétricos y algo encorvados de 8.5-15 cm, caedizos, de color moreno, opacos o levemente lustroso; colocados por pares o en grupos de tres; extendidos o ligeramente colgantes, casi sésiles o sobre pedúnculos de 10-15 mm, por lo general dejan el pedúnculo en la ramilla. La madera es blanca y resinosa.

Crece en bosques de pino, pino-encino y en bosques de Junípero. Es usual encontrarla formando masas naturales en lugares con precipitaciones pluviales oscilando entre 900 y 1600 mm y entre 11°C y 18°C de temperatura media anual. Frecuenta suelos arenosos, areno-limosos y profundos en altitudes entre 1400 y 3200 msnm. También puede crecer en sitios más secos, aunque en estos lugares los árboles crecen aislados y poco o muy ramificados.

### **6.3 *Cupressus lindleyi* Klotzsch**

Árbol o arbusto arborescente corpulento, perennifolio, de 10 a 30 m (hasta 40 m) de altura, con un diámetro a la altura del pecho de 60 cm. (hasta 1 m). Copa cónica, su sombra es densa. Hojas en forma de escamas con ápice agudo, imbricadas, de cerca de 2mm de largo por 1 mm de ancho, verde azulado oscuro. Tronco recto. Ramas extendidas algo ascendentes. Corteza de color gris o pardo rojizo desprendible en bandas largas y estrechas, resinosa. Los conos masculinos son ovales de casi 4 mm de largo y color amarillento, en la parte Terminal de las ramillas. Los conos femeninos globosos, de 8 a 16 mm de diámetro, café rojizos, en las axilas de las ramas, dehiscentes. La producción precoz de conos masculinos caracteriza al género. Monoicos.



**Figura 12. Cedro blanco (*Cupressus lindleyi* Klotzsch). Foto tomada por Jeff Bisbee (Arboretum de Villardebelle, 2005)**

Crece en una amplia gama de condiciones ambientales, laderas húmedas de cerros, arroyos, barrancas y huertos familiares. Región climática subhúmeda habita en sitios donde la temperatura promedio anual es superior a los 12 °C y la precipitación anual entre 1,000 y 3,000 mm.

## VII. DESCRIPCIÓN DE LAS ZONAS DE ESTUDIO

### 7.1 Parque Nacional “Desierto de los Leones”

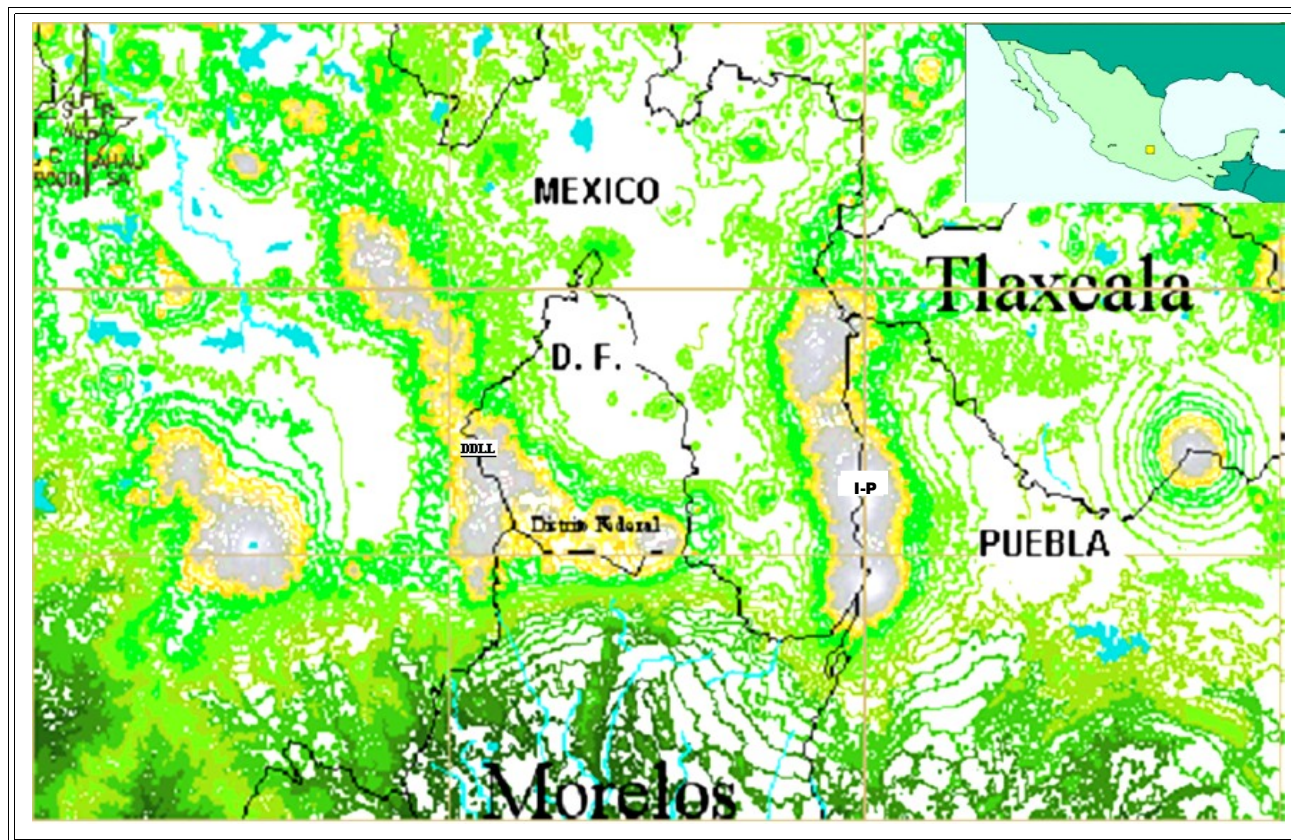


Figura 13. Ubicación dentro de los Parques Nacionales Desierto de los Leones (DDL) e Iztapopocatepetl (I-P) en la Cuenca de México

Tiene una superficie de 1,866 hectáreas. De acuerdo a mapas del Departamento Forestal y de Caza y Pesca, uno de fecha de 24 de diciembre de 1935 y con fecha de levantamiento de 12 de enero de 1930, y otro de 1937, dan una superficie de 1,866.999 hectáreas.

Ubicación Geográfica (coordenadas): El parque se encuentra dentro de las coordenadas geográficas, entre 19°15'20" y 19°19'40" de latitud Norte, 99°17'40" y 99°19'40" de longitud Oeste.

Aspectos Físicos: El polígono del parque nacional se localiza en una entrante de las estribaciones septentrionales de las Sierra del Ajusco, hacia el Noroeste de esta montaña culminante, cerca ya del sistema escabroso conocida con el nombre de las Cruces.

El terreno ofrece el aspecto de una cuchara muy inclinada hacia el Norte, en cuyo centro corre el arroyo de San Borja, observándose que en cada lado de éste, el relieve de los plegamientos es muy acentuado. Con base en la carta topográfica de la Comisión de Estudios del Territorio Nacional de 1975, de sur a norte encontramos las siguientes elevaciones: La Palma, El Cochinito, San Miguel, Los Hongos, El Caballete, Cruz de Coloxitla (Cualxipancho), Colorado. La topografía se vuelve más abrupta al Sur de parque, en los Cerros: El Caballete, Los Hongos, San Miguel, El Cochinito y La Palma. También en el sur encontramos las siguientes cañadas: Palomas, San Miguel, El Trozal, Corral de Atlalco, Agua Azul.

Por debajo de los 3,600 m.s.n.m. particularmente en los sitios ocupados por bosque de oyamel (*Abies religiosa*) se presentan suelos profundos, ricos en materia orgánica y húmedos todo el año. Por encima de este nivel el suelo se torna pedregoso, poco profundo y menos húmedo, involucrando el establecimiento de otro tipo de comunidades como el pastizal y el bosque de *Pinus hartwegii*.

Con base en el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática se tienen dos tipos de clima: En la mayor parte del parque nacional, Norte y centro, se encuentra el clima semifrío subhúmedo C (E) (w), con lluvias en verano. En la porción Sur del parque se encuentra el clima semifrío húmedo. C (E) (m) con abundantes lluvias en verano. Con base en INEGI pasan dos isotermas, una en la porción Norte de 10°C y otra en la porción centro-Sur de 8°C. Pasa una isoterma en la porción Sur del parque de 1,500 mm (FVM).

En el parque se establecen ocho ambientes climáticos que van desde el fresco subhúmedo hasta el muy frío subhúmedo. El carácter benigno de estos ambientes decrece progresivamente de Norte a Sur conforme el relieve adquiere potencia y elevación, y los vientos dominantes fluyen por los valles desplazando masas de aire.

Aspectos Biológicos: En el parque se presentan diferencias altitudinales de más de 1,000 metros, permitiéndose la aparición de distintas comunidades vegetales. Predominante es el bosque de coníferas representado por comunidades de *Abies religiosa* puras o mezcladas y de *Pinus hartwegii*. La primera comunidad se establece desde los 2,600 metros de altitud y se caracteriza por tener suelos profundos y húmedos. En los estratos medio y bajo están bien representadas las especies *Garrya laurifolia*, *Alnus firmifolia*, *Salix spp.*, *Senecio angulifolius* y *S. barba-johannis* en el primero. En el segundo, principalmente: *Acaena elongata*, *Siegesbeckia jorullensis*, *Alchemilla procumbens*, *Salvia spp.* y *Symphoricarpos microphyllus*. La comunidad de *Pinus hartwegii* se establece a partir de los 3,600 m.s.n.m. sobre suelos menos húmedos y pedregosos caracterizados por exhibir masas arbóreas prácticamente puras de esta especie y por presentar un estrato bajo muy bien representado: *Muhlenbergia spp.*, *Festuca spp.*, *Calamagrostis tolucensis*, *Lupinus spp.* y *Penstemon gentianoides*, frecuentemente se observan arbustos como *Senecio cinerarioides* y *S. salignus*. También en las partes altas, entre los 3,700 metros y el techo altitudinal son distinguibles pequeños manchones de pastizal, dominados por *Muhlenbergia macrura* y *Festuca tolucensis*, hacia la parte Sur del parque son distinguibles pequeños manchones de *Quercus spp.* (Vargas, 1997).

## **7.2 Parque Nacional “Iztapopocatepetl”**

Superficie: Del decreto de 1935 (cota de los 3,000 m.s.n.m.) el Ing. Sosa reportaba 89,800 hectáreas: Para el Estado de México 52,550, en el Estado de Puebla 31,390, en el Estado de Morelos 5,090 y en el Estado de Tlaxcala 770 hectáreas.

Ubicación Geográfica (coordenadas): Se localiza geográficamente entre los meridianos de coordenadas 9835' y 9842'40" de longitud oeste y entre los paralelos de 18°59' y 19°15'30" de latitud norte.

Aspectos Físicos: Esta área natural se localiza sobre el Sistema Neovolcanico Transmexicano, comprendiendo la topografía del lugar por el "Ixtaccíhuatl", palabra de origen náhuatl significa "Mujer Blanca", también llamada "Mujer Dormida", de siete kilómetros de longitud, se distinguen de Norte a Sur, tres alturas: la cabeza, con 5,146 metros de altura; el pecho, con 5,286 metros y los pies, con 4,740 metros; el Popocatépetl significa "Monte o Cerro que Humea", es uno de los estratovolcanes, tiene la forma de un cono truncado hacia la cima.

El Popocatépetl forma parte de la Sierra Nevada esta localizada al oriente de la Ciudad de México, con dirección Norte-Sur, formando la barrera oriental de la Cuenca de México que le separa de los Llanos de Apam y el Valle de Puebla. Entre el Popocatépetl y el Ixtaccíhuatl se encuentra el famoso Paso de Cortés, que fue el lugar desde donde el conquistador Hernán Cortés observó en gran parte el territorio de la Cuenca de México. El parque nacional presenta un rango altitudinal que va de los 3,600 a los 5,452 metros sobre el nivel del mar.

Presenta dos tipos de clima: ETH Muy frío, lluvias en verano, temperatura media anual menor de -2°C, la del mes más caliente menor de 0°C. C (w''2) (w) cig Semifrío subhúmedo, temperatura media anual de 5 a 12°C, mes más frío de 3 a 18°C.

Aspectos Biológicos: La vegetación que se encuentra en el Estado de Morelos es: *Pinus hartwegii*, *P. ayacahuite*, *P. michoacana cornuta*, *P. pseudostrobus*, *P. macrocarpa*, *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyi*; en sitios de mayor altitud se localiza el *Pinus oocarpa*, en altitudes entre 2,700 y 3,200 metros; en altitudes de 3,000 a 3,500 metros se localiza la siguiente vegetación: *Pinus lawsoni*, *P. leiophylla*, *P. oocarpa*, *P. pringlei* y *P. teocote*; así como las especies de encino: *Quercus mexicana*, *Q. crassipes*,

*Q. rugosa* y *Q. macrophylla*; otras especies de árboles forestales: *Clethra mexicana*, *Arbutus xalapensis*, *A. glandulosa*, *Arctostaphylos arguta*, *Buddleia cordata*, *B. americana* y *Dodonaea viscosa*. En altitudes de 3,200 a 4,250 metros se encuentra vegetación herbácea como son: las gramíneas *Muhlenbergia*, *Sporobolus*, *Festuca* y *Stipa*; también son frecuentes las dicotiledóneas como: *Lupinus* y *Penstemon*, a partir de los 4,250 m de altitud se inicia la vegetación de pastizal alpino y las nieves perpetuas.

Del Estado de México: *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. pseudostrobus*, *P. rudis*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *Quercus laurina*; otras especies son: *Cornus disciflora*, *Garrya laurifolia*, *Ilex toluhana*, *Meliosa dentata*, *Oreopanax xalapensis*, y *Prunus brachybotrya*. Vegetación de zacatal: *Festuca toluhensis*, *F. livida*, *F. amplissima*, *Calamagrotis toluhensis*, *Muhlenbergia quadridentata*, *Trisetum spicatum*, *Agrostis toluhensis* y *Poa orizabensis*. Del Estado de Puebla: sólo podemos mencionar que existen *Pinus ayacahuite*, *Alnus mexicana*; bosques de oyamel, bosques de pino, bosques de pino-encino y zacatal (Vargas, 1997).

## VIII. METODO

---

### **8.1 Fase de gabinete**

Las especies arbóreas utilizadas en el presente estudio, se determinaron de acuerdo a lo reportado en la literatura internacional en el campo del biomonitorio con corteza arbórea (Stanxäng, 1969; Grodzinska, 1977, 1979 y 1982;).

Para el presente estudio se identificaron las zonas cuya cubierta vegetal boscosa tuviera las especies arbóreas *Abies religiosa*, *Cupressus lindleyii* y *Pinus montezumae*, en los Parques Nacionales Desierto de los Leones e Iztapopocatepetl, de acuerdo a las cartas topográficas y en campo.

El análisis estadístico se realizó en STATGRAPHICS versión 5.0 plus para Windows, para establecer la posible correlación entre los diferentes parámetros. Así como la comparación de medias se realizó a través de una prueba de Tukey con un  $\alpha=0.05$  así como su graficación para establecer diferencia entre los diferentes factores (Especie, Zona, Temporada).

### **8.2 Fase de campo**

Se eligieron diez árboles por especie al azar y marcaron para su colecta periódica, cuyas características son: no presentar daño físico en el fuste, ni parásitos y un diámetro mayor a 50 cm del fuste de acuerdo a lo establecido por Stanxäng (1969), Grodzinska (1977, 1979, 1982) y Skye (1969).

Se tomaron muestras de 75g de corteza por cada árbol para cada periodo de muestreo Seco 1 (Noviembre 96, Diciembre 96 y Enero 97), Seco 2 (Febrero 97, Marzo 97 y Abril 97), Húmeda 1 (Mayo 97, Junio 97 y Julio 97) y Húmeda 2 (Agosto 97, Septiembre 97 y



Octubre 97), establecidos para la Cuenca del Valle de México por Jáuregui (1989) y Galindo (1989) en Calva (1999).

Se muestrearon diez árboles por cada especie en cada zona de estudio; con un tamaño de muestra de 80 por especie, 60 por período y 120 por zona; colectando la corteza a una altura de 1.5 metros sobre el nivel suelo con una profundidad de 3 mm.

Cada muestra se etiquetó y envasó, para su procesamiento en el laboratorio de acuerdo al método establecido por Stanxäng (1969), Skye (1969), Grodzinska (1977) y Härtel (1982).

### ***8.3 Fase de laboratorio***

La corteza se limpió mecánicamente con un cepillo de banco para eliminar el polvo y material orgánico, se molió y cernió en una malla de 1 mm. Se pesaron 2g de cada corteza molida por cada árbol, hidratándose con 10 ml de agua desionizada para pino y abeto, 15 ml para cedro para refrigerándose por un período de 48 hrs para la posterior cuantificación de pH y C. E. de acuerdo a Grodzinska (1971), y Martin y Gray (1971) (Figura 14).

Para la cuantificación de sulfatos y cloruros por la técnica nefelométrica publicada por Snell y Snell (1949) (Figura 45 y 47 de anexo 12.1) y nitratos por potenciometría de acuerdo a APHA, AWWA y WMO (1993) (Figura 46 de anexo 12.1). Se formaron tres macromuestras por línea de 175g (árboles 1-3, 4-6 y 7-10); cada una las cuales se hidrataron con 560 ml de agua desionizada para cedro, 280 ml para pino y abeto; se realizó una extracción en frío por 48 hrs para su posterior filtrado a vacío con filtro millipore de 47 nm

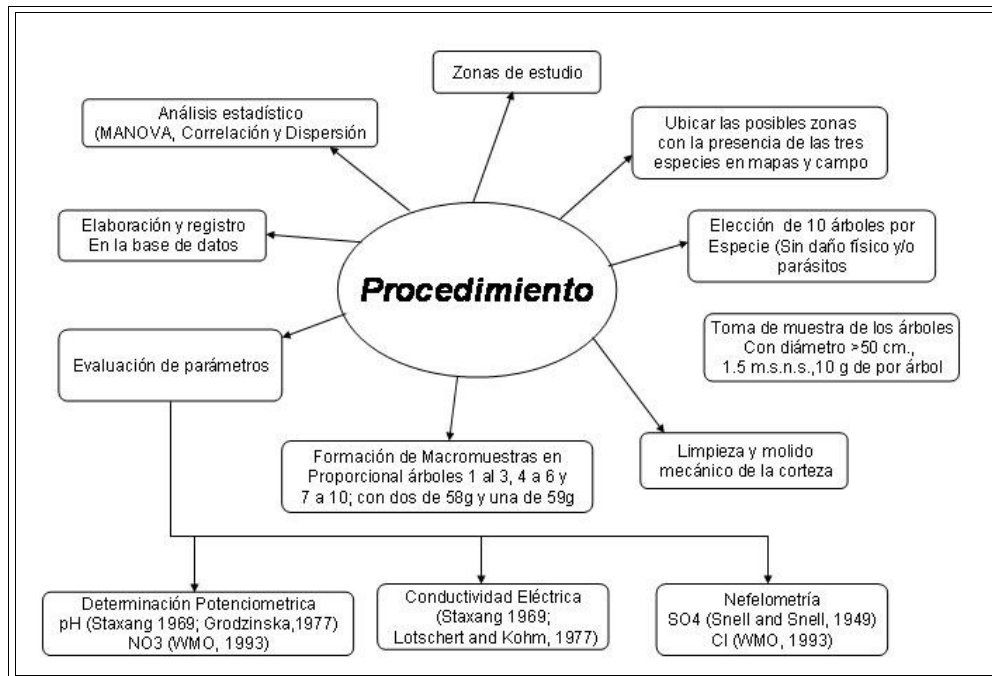


Figura 14. Mapa conceptual del procedimiento usado.

## IX. DISCUSION DE RESULTADOS

---

---

El presente análisis se divide en dos grandes aspectos: La evaluación de los precursores del depósito ácido: sulfatos, nitratos y cloruros; la evaluación del impacto del potencial de hidrógeno (protonización del ecosistema). Así como conductividad eléctrica e iones hidrónios.

Sequeira (1989) estableció que la composición química del depósito ácido se determinaba por su síntesis dentro del continente o bien, cerca del mar por aerosoles marinos.

En las ciudades cercanas al mar como Tokio, Roma y Londres el impacto de los ácidos sulfúrico, nítrico y clorhídrico sintetizado en la atmósfera urbana se ve decrementado por la presencia de los aerosoles marinos con altas concentraciones en sales. Situación contraria a las ciudades que se encuentran dentro del continente, por ejemplo: Berlín, Bonn, Moscú y Nueva Delhi.

En este contexto la Ciudad de México posee una fuerte carga de iones que actúan como bases, atenuando el impacto de los ácidos atmosféricos. Como se sabe, la composición de la comunidad arbórea en el bosque de Izta-Popo y Desierto de los Leones son: *Abies religiosa* (oyamel), *Cupressus lindleyi* (cedro) y *Pinus montezumae* (pino). Estando presentes en los sitios de colecta. Las concentraciones registradas son significativas entre sí, pese a cohabitar la única manera de explicar las diferencias es a través de las propiedades mecánicas de la corteza arbórea (densidad, compactividad, composición química, conductividad térmica, etc.) (Martin y Gray, 1971).

Como en la mayoría de los estudios se asume una dispersión Gaussiana de los datos registrados, yo presento los diagramas y con base en ello, se aplicó la prueba estadística diferencia de la varianza de medias con un intervalo de confianza de 95%.

## 9.1 Evaluación del depósito ácido

### 9.1.1 Sulfatos

#### 9.1.1.1 Análisis Especie vs Temporada

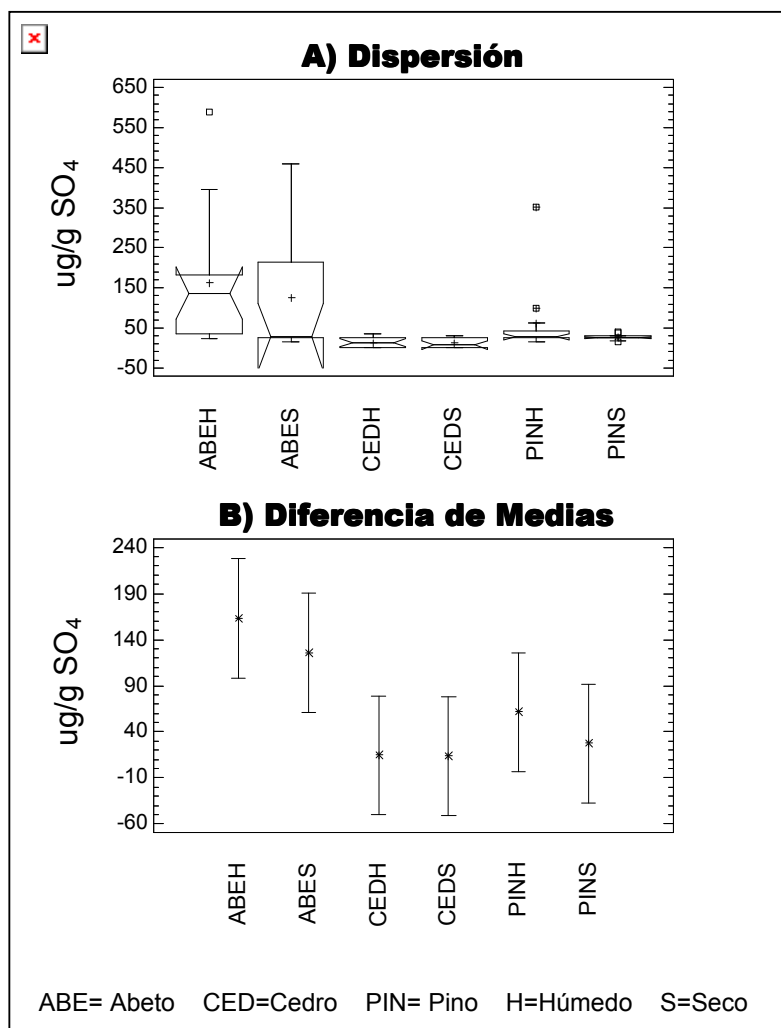


Figura 15. Análisis temporal por especie del depósito de sulfatos

Las muestras del oyamel expresaron una amplia dispersión (Fig.15 A) en la colecta, que representa la temporada seca (ABES) y húmeda (ABEH), siendo que cedro (CEDS, CEDH) y pino (PINS, PINH) observaron un comportamiento poco disperso (Fig. 15 A).

Las concentraciones de sulfatos son mayores a las reportadas por Báez, et al (1996), así como en otros estudios realizados en el depósito húmedo (wet deposition) y total

(bulk deposition) en Estados Unidos y Canadá. El análisis especie-temporal es un factor importante en el depósito de los sulfatos presentando diferencias significativas de abeto con pino y cedro para ambas temporadas (Fig. 15 B).

### 9.1.1.2 Análisis entre Especies

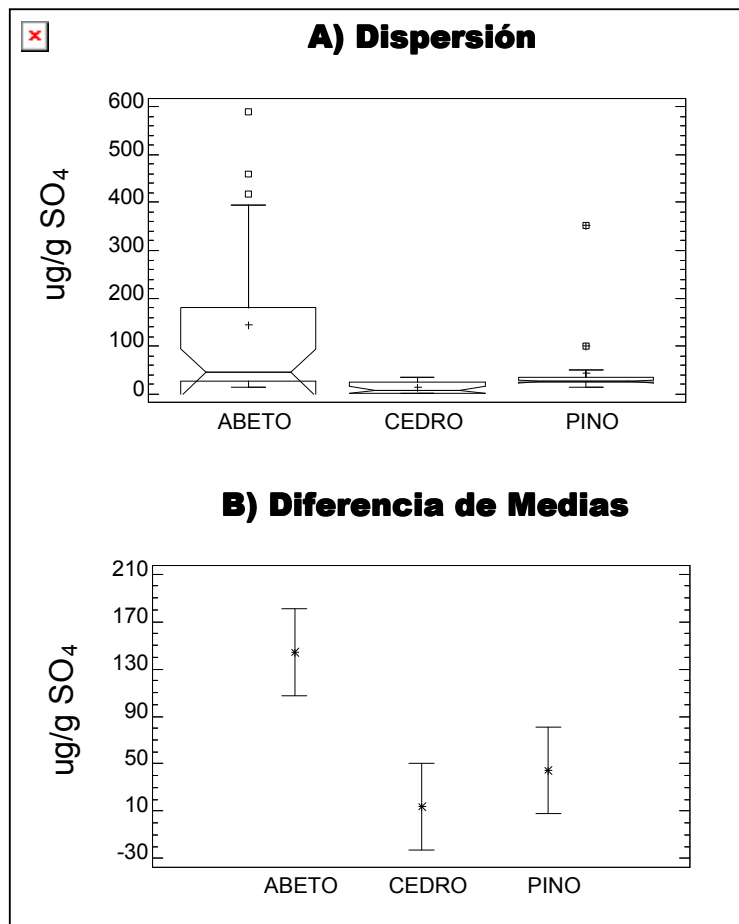


Figura 16. Análisis por especie del depósito de sulfatos

La amplitud en la dispersión del depósito en abeto es debido a una mayor sensibilidad en esta especie con respecto a pino y cedro. Así como la presencia de valores extraordinarios entre el que resalta uno de 600  $\mu\text{g/g}$  (Fig. 16 A). Lo anterior puede deberse a las características propias de la corteza en abeto cuya sensibilidad a los sulfatos la destacan.

El depósito del ion sulfato con respecto a la especie, tiene marcadas diferencias significativas (Fig. 16 B) para abeto con respecto a pino y cedro, el oyamel la especie

que su media (140  $\mu\text{g/g}$ ) es la de mayor acumulación con respecto a cedro (20  $\mu\text{g/g}$ ) y pino (35 $\mu\text{g/g}$ ).

La dispersión que presenta en esta especie es considerablemente mayor debido a la presencia de 3 eventos extraordinarios que afectan dicha dispersión por sus altos valores sesgando la dispersión.

Lo anterior confirma lo reportado por Calva (1999) con rangos de concentración para sulfatos en abeto de 30 a 2800 ppm<sup>1</sup> presentando el mismo comportamiento que en el presente.

Las coníferas han sido reportadas como sensibles al depósito ácido, los efectos de la entrada vía estomatal  $\text{SO}_2$  van desde alteraciones celulares hasta la clorosis, pérdida del follaje que llevan a la muerte del individuo. Este proceso se lleva acabo al oxidarse el  $\text{SO}_3^{-2}$  a  $\text{SO}_4^{-2}$  (Krupa, 1977), acelerando el metabolismo celular formando tioles y como subproducto  $\text{H}_2\text{O}_2$  estimulando el sistema de fase luminosa, así como la eficiencia fotosintética (Kaziol and Whatley, 1984).

Los bosques al acelerar los individuos su metabolismo, comienzan a tomar una mayor cantidad nutrimentos cationicos desestabilizando el sistema de toma de amonio. A nivel edáfico acelera la liberación de Fe y Al que al oxidarlos crean una alteración en la entrada de nutrimentos por antagonismo y sinergismo con otros cationes que como consecuencia lleva a un estrés en el arbolado (Evans, et al 1981).

### 9.1.1.3 Análisis Temporal

Desde el punto de vista temporal, el depósito de sulfatos es superior al reportado en el Programa de Precipitaciones Acidas de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México

---

<sup>3</sup> Las concentraciones reportadas por otros autores como partes por millón (ppm), miligramo por litro (mg/l) son equivalentes a microgramo por gramo ( $\mu\text{g/g}$ ) en el presente trabajo

(PPAZMCM, 1997) de 3.3 a 23.49 mg/l en la captación automática del material particulado para deposito total y de 3 a 60.6 mg/l en deposito húmedo.

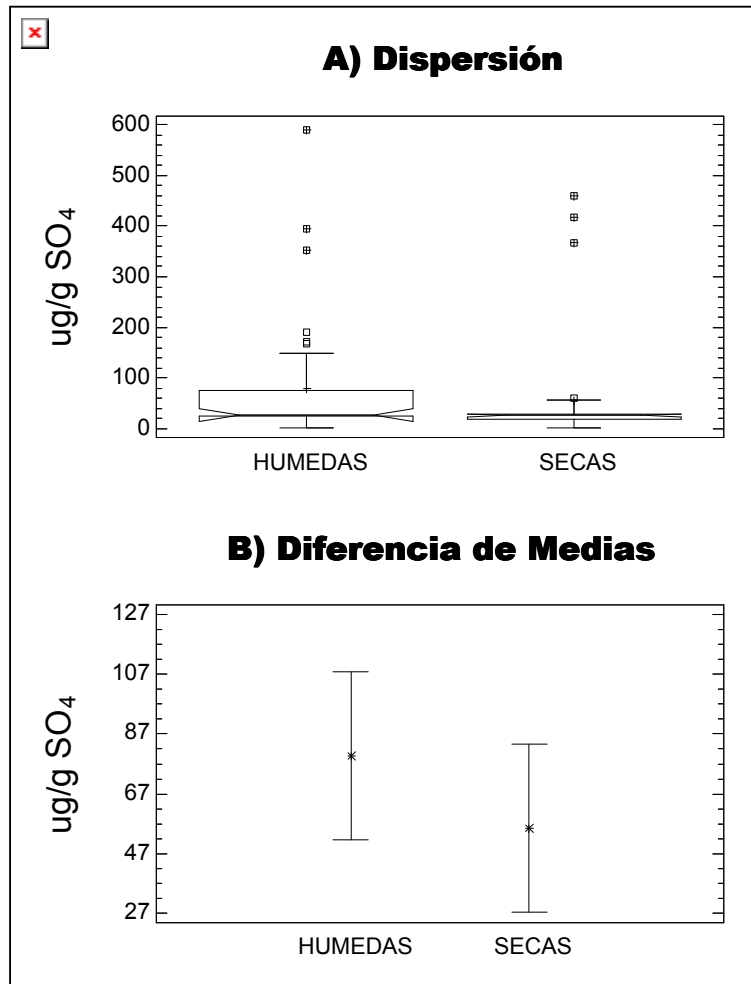


Figura 17. Análisis temporal de la depositación de sulfatos

En ambos periodos de muestreo, húmedas y secas, existen valores extremos que ejercen un sesgo en las varianzas de las medias, 79.5  $\mu\text{g/g}$  para húmedas y 55.5  $\mu\text{g/g}$  (Figura 17 A). Sin embargo, es imposible dejar de reconocer que el ion sulfato tiene mayor presencia en el periodo húmedo (Fig. 17 B) con respecto al seco. La amplitud registrada muestra la necesidad de incrementar el número de muestras al doble por la apertura del intervalo de confianza.

La depositación de sulfatos tiene como factor importante a la temporada, manifestando la importancia de la vía de incorporación al ecosistema.

La diferencia existente entre las medias de las temporadas se podría deber a la presencia de hidrocarburos ( $HC_x$ ) y Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) que ejercen un antagonismo con el ion sulfato para su depositación, cuya vía principal de incorporación es húmeda, al pasar el  $SO_2$  a  $H_2SO_4$  en presencia de ozono durante los procesos fotoquímicos en la atmósfera (Franzle, 1993). De ahí que la incorporación húmeda de los contaminantes al ecosistema sea la de mayor aporte.

La vía seca cobra importancia al quedar inhabilitado el deposito húmedo, al formar por nucleación  $(NH_4)_2 SO_4$ , el cual se adsorbe en la corteza arbórea incorporándose en forma de gas (Krupa,1977).

El papel de las partículas neutralizantes provenientes del vaso de Texcoco es sumamente importante, permiten la formación de material particulado y aerosoles cuya concentración se refleja en la época de estiaje (Calva, 1999).

Miranda *et al.*, (1992) reporta una fuerte relación entre iones hidrónios, azufre con sulfato de amonio y ácido sulfúrico atmosférico; Báez et al (1993) con concentraciones de 5.16 a 12.04 ppm con una correlación de 0.904 en la Cd de México, dicha ruta refleja en forma directa la cantidad de acido generado por  $SO_2$  con respecto a la cantidad de partícula neutralizada por  $NH_3$  (Franzle, 1993) con concentraciones similares de sulfatos para este último.

#### **9.1.1.4 Análisis Espacial**

La depositación especial del sulfato refleja un comportamiento similar en ambas zonas con distribuciones que se reflejan en su dispersión, con presencia de numerosos valores extremos que influyen en su dispersión (Figura 18 A) y en la apertura del intervalo de confianza, sin poder establecer diferencia significativa entre las zonas (Figura 18 B)



La presente equivalencia en el depósito puede deberse al incremento en de  $\text{SO}_x$  provenientes del sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) de la actividad del Volcán Popocatepetl cuyo aporte puede ser más significativo en el futuro. Las concentraciones altas de sulfatos en DDLL están dadas por el arrastre de las emisiones de  $\text{SO}_x$  en la ZMCM que son generados en el norte (parques industriales) y centro (altos flujos vehiculares) de la misma durante 9 meses al año.

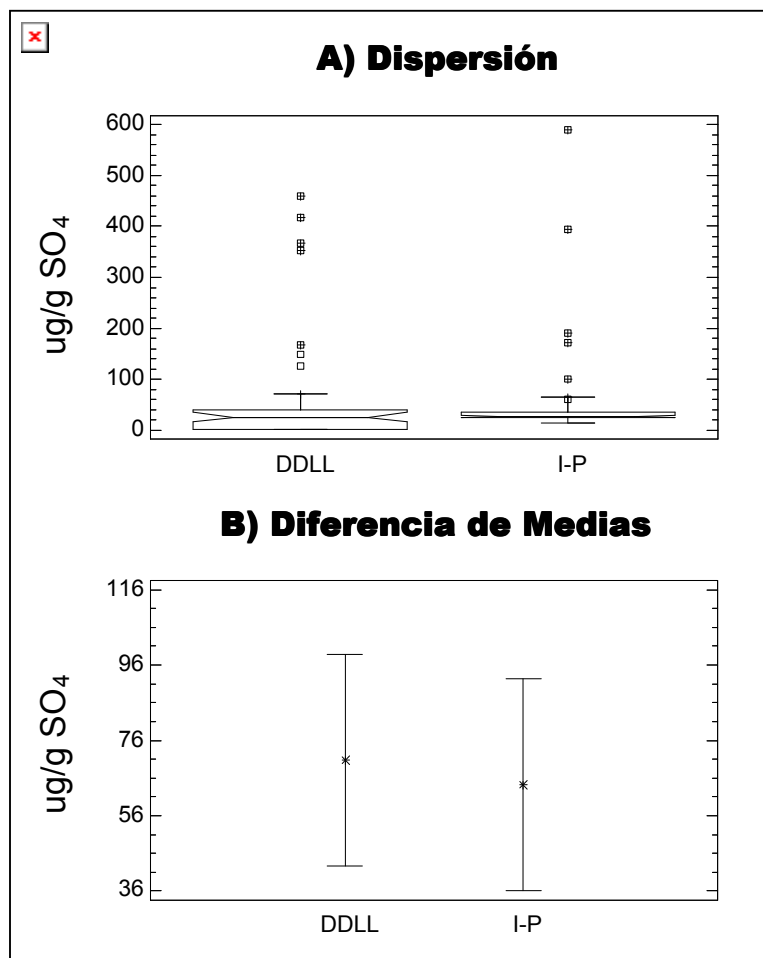


Figura 18. Análisis espacial de la depositación de sulfatos.

El Programa de las Precipitaciones Ácidas para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PPAZMCM, 1997) reportó para este año concentraciones 3.3 (Pedregal y Tepeyac) a 60.7 mg/l (Lomas) que son superadas en el presente estudio. Esta diferencias están fincadas en el tipo de muestreo realizado (Automático por evento de

captación de lluvia o material particulado RAMA), resaltando la gran capacidad de la corteza como biomonitor y bioacumulador, que al actuar como una esponja, refleja de una manera mas consistente y a un menor costo, la salud del ecosistema, cuantificando el ion incorporado al mismo, resultado de la lixiviación e incorporación del deposito ácido en las copas y fustes del arbolado.

#### **9.1.1.5 Análisis Especie-Espacial**

En la figura 19 A se expresa gráficamente el depósito seco para DDLL en donde podemos determinar la importancia de su contribución por medio de las 3 especies (abeto, cedro y pino).

En I-P la ruta principal de incorporación del ion es la húmeda. Lo anterior, puede deberse a la mayor cercanía de DDLL a la ciudad donde la concentraciones de HC<sub>x</sub> y COV son mayores y favorecen su depositación por vía seca.

En abeto, el depósito se presenta con una mayor dispersión (Figura 19 A1) en DDLL durante la temporada seca (DLS) a contraste de I-P que es en la temporada húmeda (IPH) indicando diferente vía de incorporación del depósito. Para el cedro la temporada seca presenta mayor depósito en contraste con el pino cuya época de mayor del depósito es la húmeda. La ruta de incorporación a la corteza varía con respecto a la especie.

Por lo anterior, se observa que en abeto y cedro en DDLL es seco al quedar inhabilitada la vía seca por los COV<sup>2</sup> provenientes de la ZMCM y solo se puede depositar a través de aerosoles como el (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> SO<sub>4</sub> (Franzle, 1993)

---

<sup>2</sup> Para mejor comprensión del proceso de incorporación ver la sección 5.8

Solo en abeto de DDLL se determinó la diferencia significativa entre secas (DLS) con respecto a húmedo (DLH), por su parte también se observó la conducta contraria en I-P.

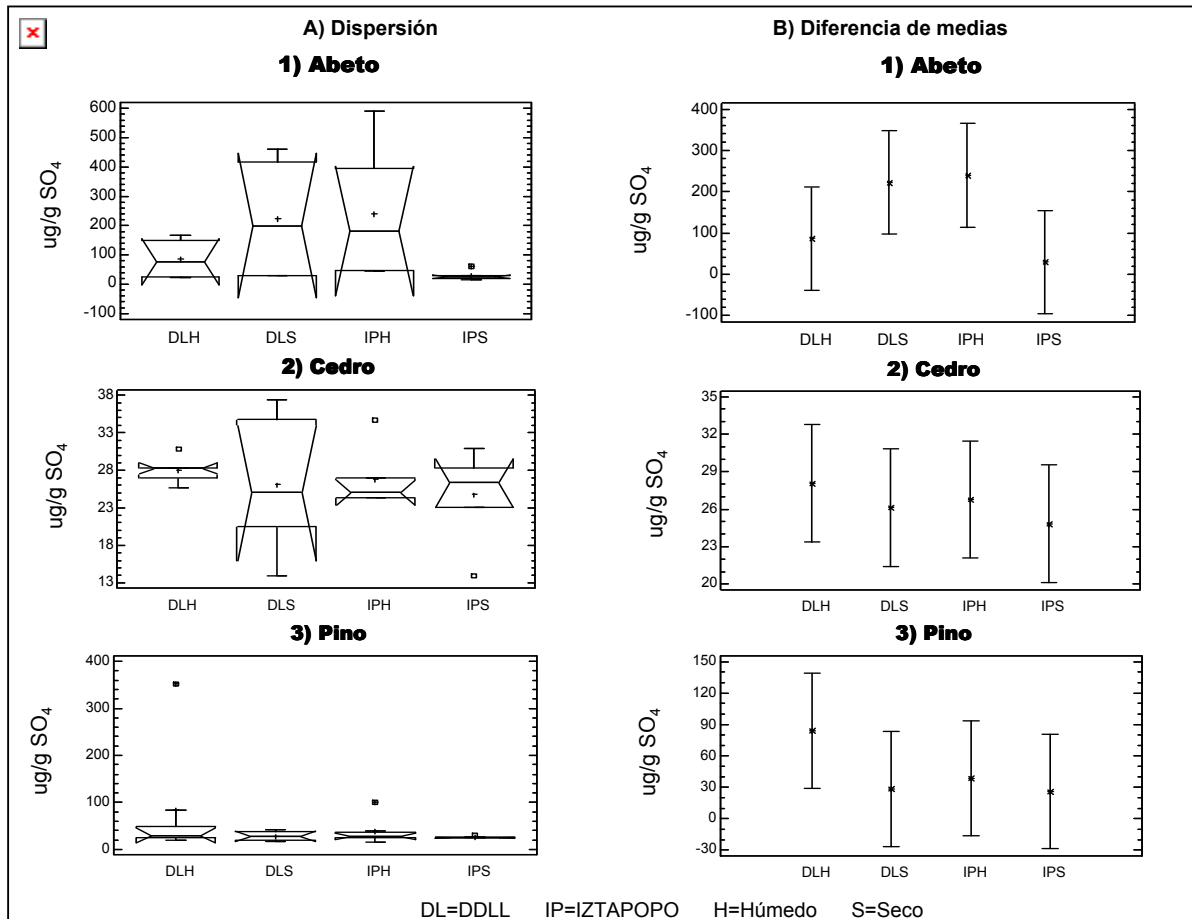


Figura 19. Análisis especie-espacial del depósito de sulfatos

Se observó la anterior conducta entre húmedas en I-P (IPH) con respecto a DDLL húmedas (DLH) e I-P secas (IPS), sin llegar a influir en forma estadística este factor en forma global.

En cedro y pino se presentan comportamientos similares para las medias en todos los factores sin llegar a determinarse diferencias significativas (Figuras 19 B2-3). Por su parte el período húmedo es ligeramente de mayor captación,

## 9.1.2 Nitratos

### 9.1.2.1 Análisis Especie vs Temporada

El depósito de nitratos presenta distribuciones uniformes a excepción de abeto para el periodo húmedo (ABEH), que es sesgada hacia el mínimo con una media de 89.6  $\mu\text{g/g}$  (Figura 20 A).

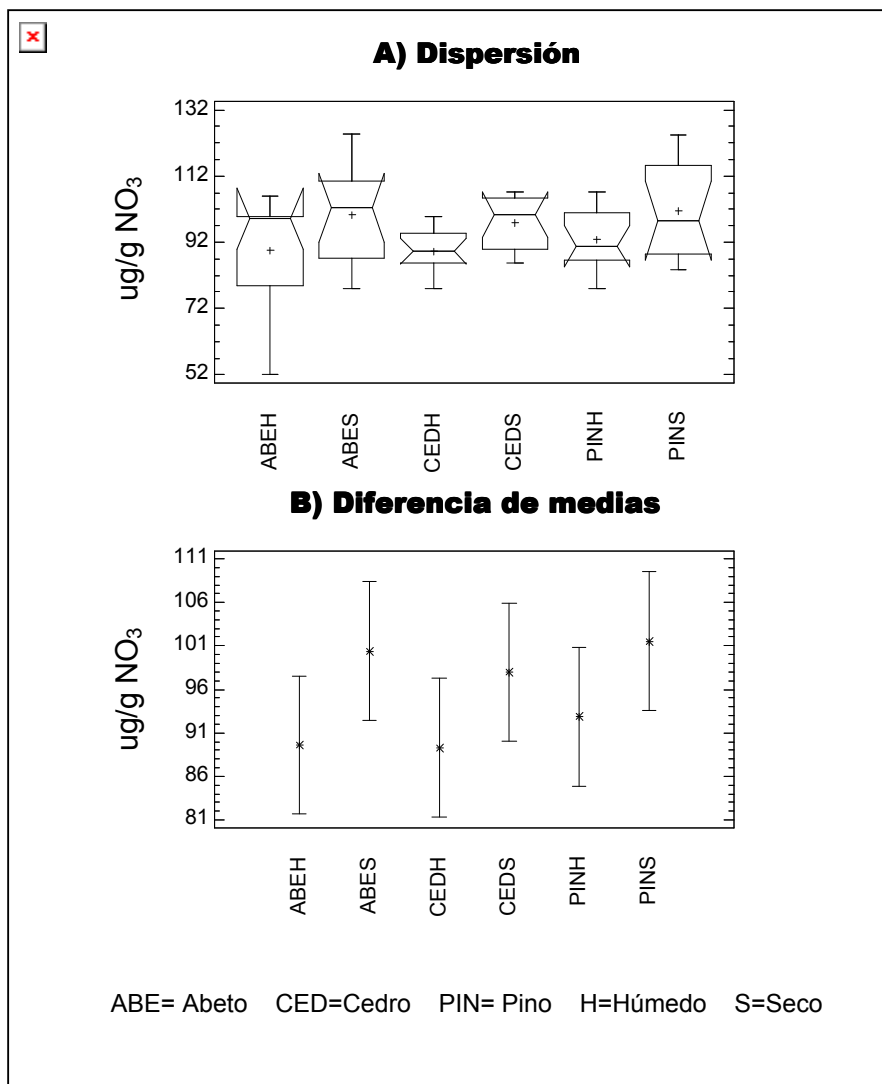


Figura 20. Análisis temporal por especie del depósito de nitratos

Se determinó diferencias significativas entre cedro húmedo (CEDH=63.2  $\mu\text{g/g}$ ) y abeto para ambas temporadas (ABEH=89.6  $\mu\text{g/g}$  y ABES=100.4  $\mu\text{g/g}$ ) con pino seco (PINS=

101.5  $\mu\text{g/g}$ ), cabe mencionar que en el análisis global la relación entre las especies y temporada no tiene un efecto significativo desde el punto de vista estadístico. Entonces solo se determinó diferencias significativas para las tres especies (abeto, cedro y pino) de la temporada húmeda con respecto a la seca (Figura 20 B).

Estas concentraciones son sumamente altas respecto a lo reportado por el PPAZMCM (1997) cuyo rango de valores medios entre 1.79 a 7.21 mg/l; destacando eventos de 31.35 mg/g en Lomas y 18.83 para el depósito húmedo, evaluados en muestreo automático en precipitación.

Calva (1999) reporta para estas tres especies medias de 97 ppm que son similares a las concentraciones promedio en húmedas para las tres especies. Resalta el hecho que el depósito de esta partícula es ligeramente mayor en el periodo seco en todas las especies.

#### **9.1.2.2 Análisis entre Especies**

El depósito de nitratos en cedro presenta una distribución uniforme, pino con una media sesgada hacia el mínimo en contraste con abeto cuya media está hacia el máximo y cuya distribución es más amplia (Figura 21A).

El análisis por especie para este ión no es significativo, con intervalos de confianza amplios atribuibles al efecto del número de muestra sobre las medias, que en próximos estudios deben duplicarse (Figura 21B).

Los valores aberrantes mínimos de 52 y 57  $\mu\text{g/g}$ , se deben a la dilución que presenta el ión durante la época de lluvia en abeto, a las propiedades mecánicas de la corteza y al antagonismo que sufre este ión.

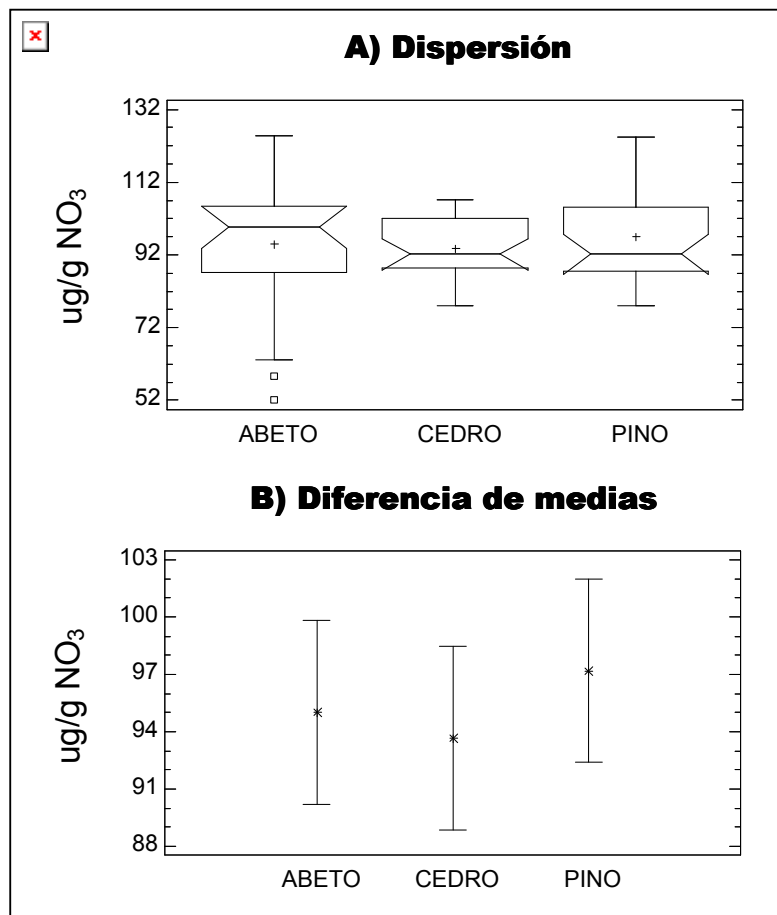


Figura 21. Análisis por especie del depósito de nitratos

Se presentaron concentraciones ligeramente superiores a las reportadas por Calva (1999) para las tres especies con media de 92 ppm, con valores de 95  $\mu\text{g/g}$  para abeto, 93  $\mu\text{g/g}$  para cedro y 97  $\mu\text{g/g}$  para pino

### 9.1.2.3 Análisis Temporal

La distribuciones presentes en ambas temporadas son uniformes, de manera particular la temporada húmeda con tres valores extremos que afectan en su dispersión de 52, 59 y 65  $\mu\text{g/g}$  (Figura 22 A).

Las diferencias significativas entre las temporadas con valores de media son de 91  $\mu\text{g/g}$  para húmedas y 100  $\mu\text{g/g}$  para secas (Figura 22 B). Lo anterior, es muy superior a lo

reportado por el PPAZMCM (1997) con valores de 4.5 a 7.2 mg/l para Xochimilco, el museo Papalote y la estación de Tlanepantla por método automático.

Al ser la vía seca la mayor ruta de depósito para nitratos, establece que en su formación y transporte de ésta partícula en fase gaseosa con una gran cantidad de aerosoles.

El depósito de este ion durante la época seca se ve favorecido por la alta emisión de  $\text{NO}_x$ , por actividad volcánica del Popocatepetl que se vio incrementada a mediados de 1996 hasta septiembre de 1997 (CENAPRED) reflejándose en las concentraciones durante la temporada seca de 1997 (noviembre 1996 a abril 1997), la cual se refleja en su depositación.

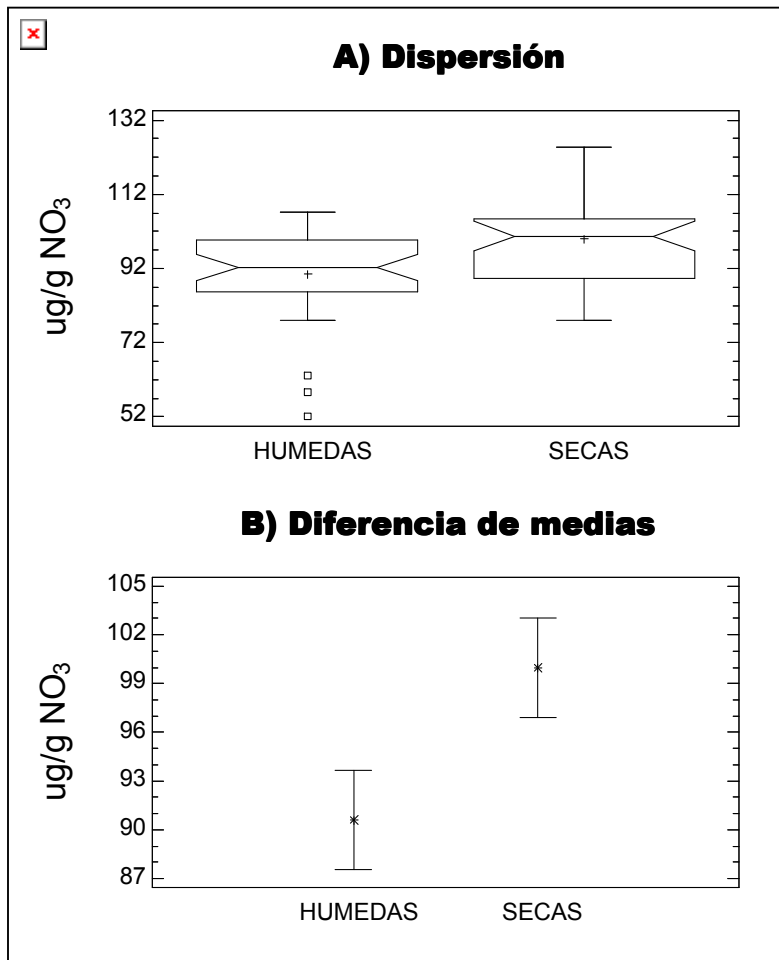


Figura 22. Análisis temporal del depósito de nitratos

#### 9.1.2.4 Análisis Espacial

La depositación espacial de nitratos presenta diferencias significativas entre ambas zonas, con medias de 98 y 92  $\mu\text{g/g}$  para DDLL e I-P respectivamente (Figura 22B).

Para ambas zonas presentan una distribución uniforme, destacando los valores aberrantes en I-P hacia ambos extremos. Los valores mínimos son debido a una dilución en el depósito durante la época húmeda, los valores máximos coinciden con la época húmeda, los valores máximos coinciden con la época de secas donde se presentó gran actividad del volcán (Figura 22A).

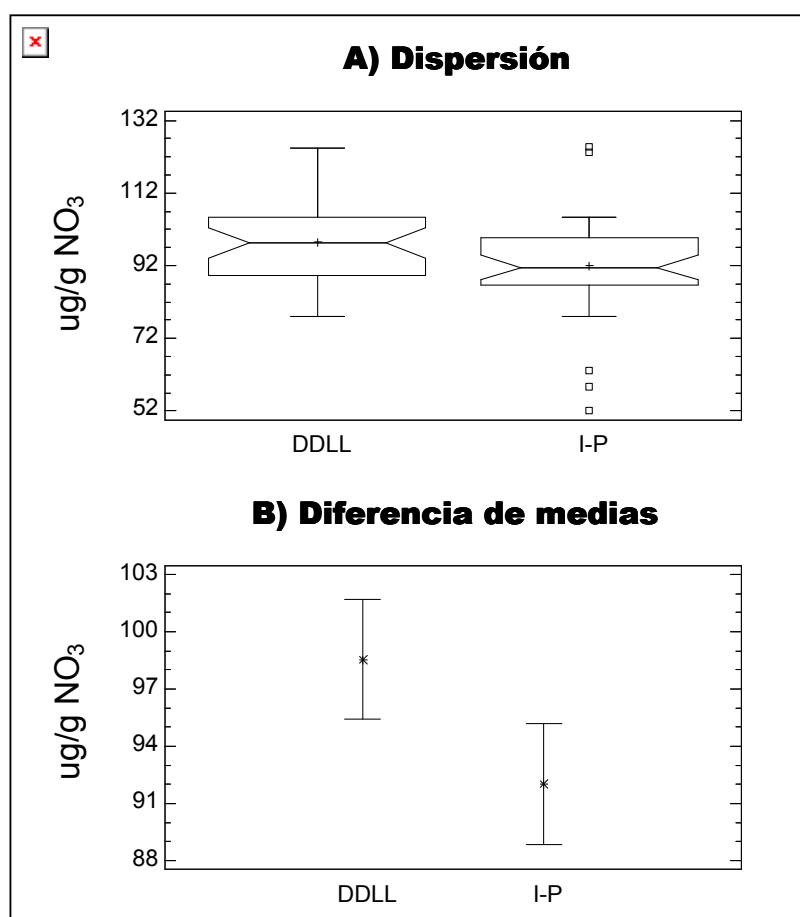


Figura 23. Análisis espacial del depósito de nitratos

En el presente estudio las concentraciones de nitratos son ligeramente superiores a lo reportado por Calva (1999) de 88  $\mu\text{g/g}$  en I-P y similar en DDLL 98  $\mu\text{g/g}$ .



La rosa de vientos predominante en la Cuenca del Valle de México dispersa los contaminantes durante 9 meses al año en dirección Norte Sur-sureste favoreciendo la depositación en el DDLL, al transportar los contaminantes.

#### **9.1.2.5 Análisis Especie-Espacial**

En abeto para DDLL no se presentan diferencias significativas entre ambas temporadas, con medias de 100  $\mu\text{g/g}$  en húmedas (DLH) y 94  $\mu\text{g/g}$  en secas (DLS). En el caso de I-P se presentan diferencias significativas con medias de 79  $\mu\text{g/g}$  en temporada húmeda (IPH) y 107  $\mu\text{g/g}$  para el seco (IPS) (Figura 24 B1).

La dispersión en DDLL en ambas temporadas es compacta, en I-P es más abierta en húmedas (IPH). Sin embargo, el mayor depósito se observa en secas con sesgo al mínimo. Resalta que contrastan los mecanismos de incorporación de este ion para esta especie por zona en DDLL es húmedo respecto al seco en I-P (Figura 24 A1).

Lo anterior, muestra una tendencia a la vía seca de este ion en I-P cuyo valor es superior inclusive a los presentados en DDLL sin ser significativos, lo cual podría ser atribuible a las emisiones provenientes del volcán Popocatepetl.

En cedro, no se presentan diferencias significativas entre temporadas para la misma zona. Sin embargo, se presentan entre el período húmedo de DDLL (DLH) con 88  $\mu\text{g/g}$  y el seco de I-P (IPS) con 98.5  $\mu\text{g/g}$  (Figura 24 B2).

Resalta también en ambas zonas el aumento del depósito durante la temporada seca respecto a la húmeda sin llegar a ser significativo desde el punto de vista estadístico. Con dispersiones similares para ambas zonas y temporadas, compactas para húmedas (DLH e IPH) y abiertas en secas (DLS e IPS) (Figura 24 A2).

En pino, se presentan diferencias significativas entre las temporadas para DDLL con 97  $\mu\text{g/g}$  en húmedas (DLH) y 113  $\mu\text{g/g}$  para secas (DLS) con distribuciones uniformes. En I-P no se presentan diferencias significativas con medias de 87  $\mu\text{g/g}$  para húmedas (IPH) y 89  $\mu\text{g/g}$  durante secas (IPS), mostrando que no hay un mecanismo de incorporación dominante en esta especie y zona (Figura 24 B3).

La dispersión se presenta compacta para I-P en ambas temporadas y en DDLL es amplia y homogénea, con mayor depósito debido a la concurrencia de los vientos durante 9 meses al año y a su cercanía con la ciudad (Figura 24 A3).

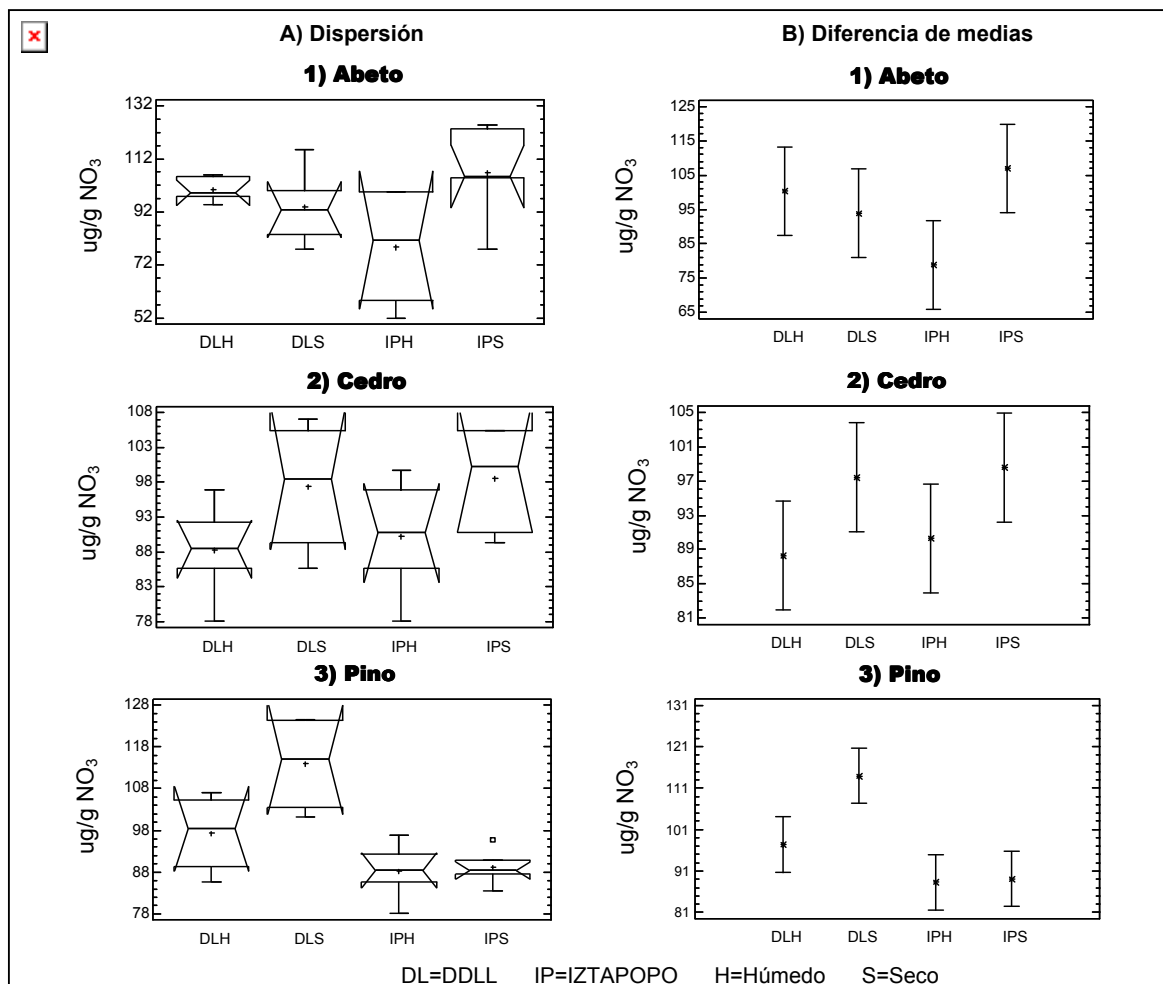


Figura 24. Análisis Especie-Espacial de Nitratos

### 9.1.3 Cloruros

#### 9.1.3.1 Análisis Especie vs Temporada

El análisis especie-temporal es un factor no es importante en el depósito de los cloruros, presentando solo diferencias significativas de abeto seco con cedro en húmedas (Figura 25 B).

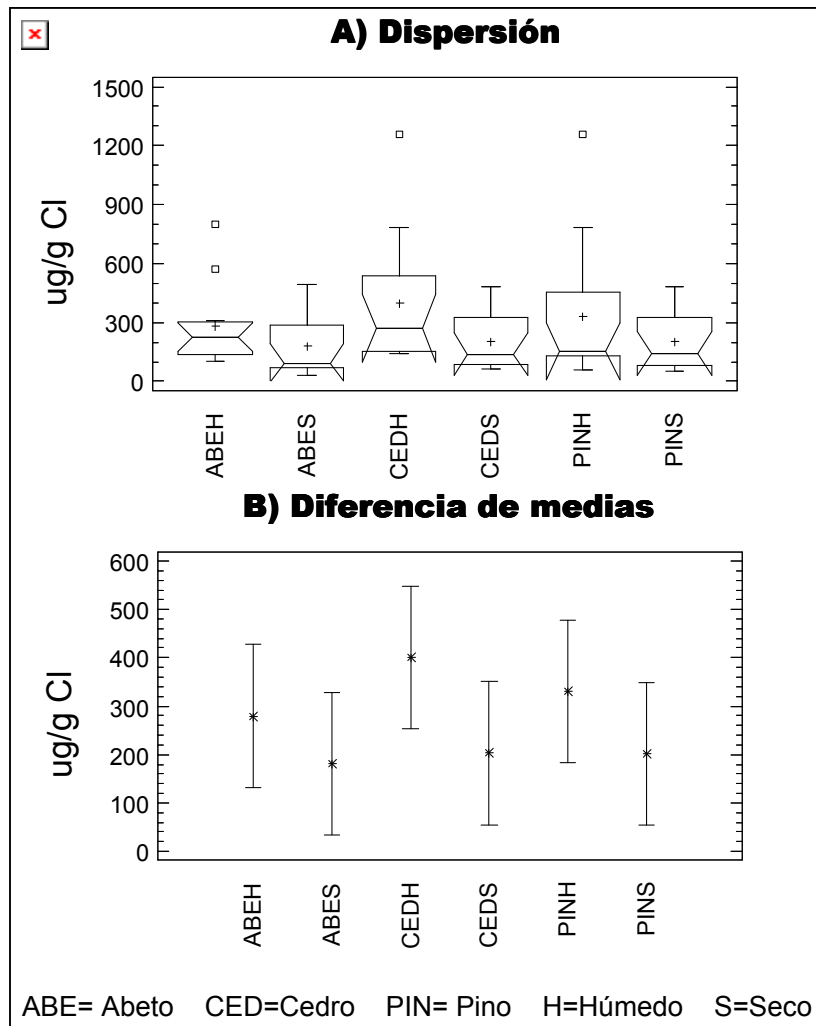


Figura 25. Análisis temporal por especie del depósito de cloruros

La concentración de cloruros durante la temporada seca es homogénea para las tres especies con rangos que van de 30 a 340 µg/g, durante la temporada húmeda cambia este comportamiento al existir cuatro episodios extraordinarios de 600 y 800 µg/g para

abeto; de 1200  $\mu\text{g/g}$  para cedro y pino que influyen significativamente en la comparativa entre los factores (Figura 25 A). Dichos eventos extraordinarios pueden atribuirse a la presencia de compuestos organoclorados de las fumigaciones utilizadas en las zonas agrícolas como lo establece Calva (1999).

Por lo anterior, se presentan diferencias significativas entre el abeto seco (ABES) y cedro en húmedas (CEDH) cuyas medias son 200 y 400  $\mu\text{g/g}$  respectivamente. Destacan también el aumento en la media entre las temporadas para las otras dos especies de 280  $\mu\text{g/g}$  en abeto y 320  $\mu\text{g/g}$  para pino, sin ser significativas estadísticamente (Figura 25 B).

Este ion forma diferentes aerosoles que por nucleación y condiciones húmedas se depositan por efecto de la gravedad, ocasionando daños similares a los provocados por  $\text{SO}_2$

#### **9.1.3.2 Análisis entre Especie**

El depósito de cloruros entre las tres especies no presenta diferencias significativas. Presentan con distribuciones semejantes en las tres especies, cuyas medias son de 230  $\mu\text{g/g}$  en abeto, 300  $\mu\text{g/g}$  en cedro y 265  $\mu\text{g/g}$  para pino, por efecto del número de muestras en este estudio (Figura 26 B).

El comportamiento de su dispersión es similar para las tres especies, con excepción del valor extremo de 1250  $\mu\text{g/g}$  presente en cedro y pino (Figura 26 A)

El cloro provoca necrosis, abscisión abrupta, blanqueamiento y necrosis en algunas especies de árboles, en coníferas provoca necrosis en forma descendente en la copa en concentraciones de superiores de 7 ppm por algunos minutos ocasiona severos daños con solo incrementar ligeramente la concentración del mismo.

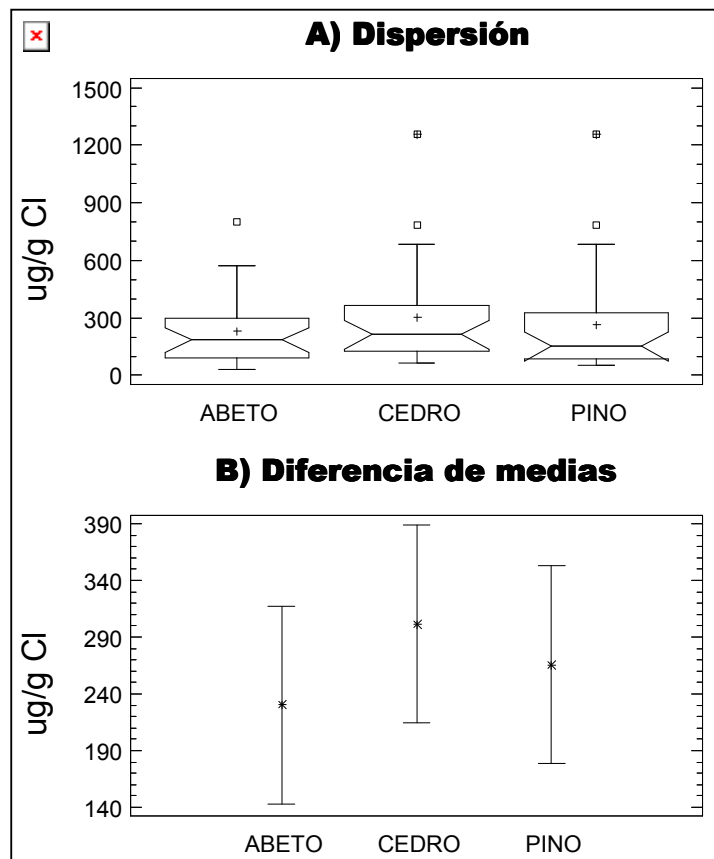


Figura 26. Análisis por especie del depósito de cloruros

Las lesiones pueden ser variadas desde necrosis marginales hasta diversas formas de clorosis (Krupa, 1977)

Estas concentraciones son semejantes a las reportadas por Calva con concentraciones promedio de 350 ppm ( $\mu\text{g/g}$ ) para las tres especies

### 9.1.3.3 Análisis Temporal

La distribución temporal de cloruros esta sesgada hacia el mínimo con distribuciones, destacando el hecho que los valores aberrantes para ambas temporadas no ejerce un efecto significativo sobre el valor de la media (Figura 27 A).

Las temporadas presentan diferencias significativas, con medias de 336  $\mu\text{g/g}$  y 195  $\mu\text{g/g}$  para húmedas y secas respectivamente (Figura 27 B).

Las diferencias presentadas se deben al efecto acumulativo de las emisiones del volcán Popocatepetl durante 1997 (CENAPRED, 2001) se mantuvieron constantes para ese año de enero a octubre del mismo, dicho efecto se ejerce al incorporarse el cloruro por vía húmeda de cloruros

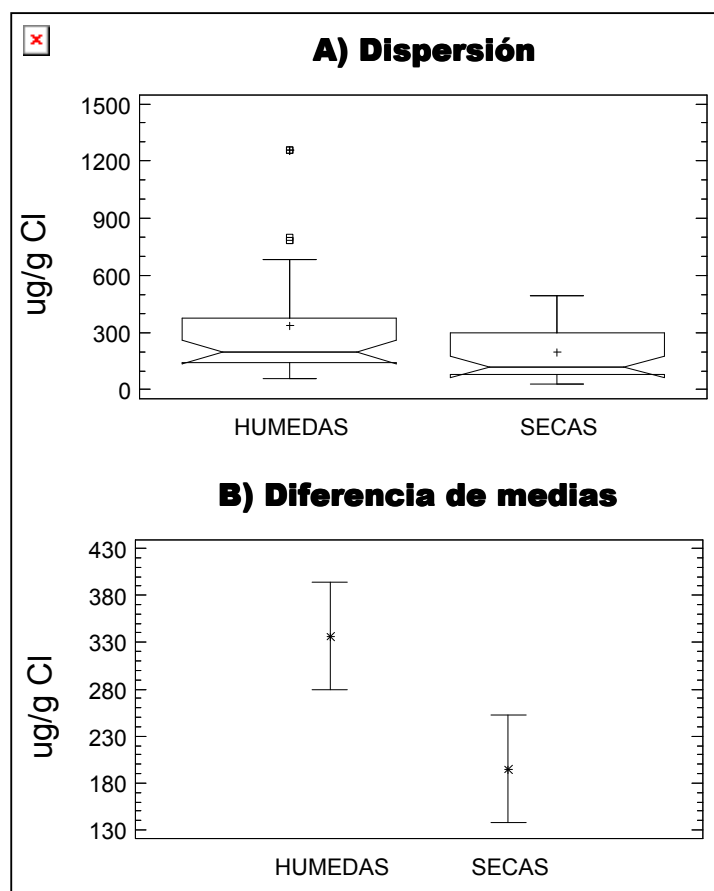


Figura 27. Análisis temporal del depósito

#### 9.1.3.4 Análisis Espacial

Para ambas zonas se presenta una distribución uniforme (Figura 28 A), sin diferencias significativas entre ambas zonas con medias de 313  $\mu\text{g/g}$  en DDLL y 219  $\mu\text{g/g}$  en I- P (Figura 28 B).

Estas concentraciones son menores a las reportadas por Calva (1999) con 420 ppm en ambas zonas.

La diferencia de concentraciones entre las zona es el resultado de la impactación de vientos durante 9 meses al año hacia el DDLL que trae consigo una gran cantidad de contaminantes y a la gran utilización de compuestos organoclorados utilizados en la Ciudad de México como son los insecticidas.

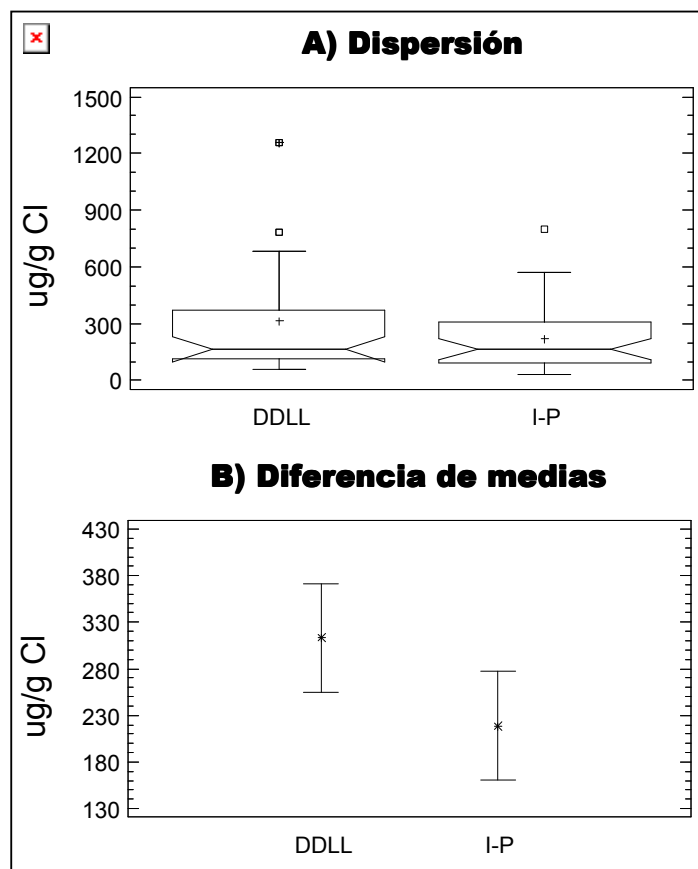


Figura 28. Análisis espacial del depósito de cloruros

### 9.1.3.5 Análisis Especie-Espacial

En abeto no se presentan diferencias significativas (Figura 29 B1) entre las temporadas en DDLL con medias de 158  $\mu\text{g/g}$  en húmedas (DLH) y 178  $\mu\text{g/g}$  en secas (DLS) con distribuciones uniforme y bimodal respectivamente (Figura 29 A1). En I-P se la

incorporación del cloruro se lleva a cabo en la temporada húmeda con una media de 400  $\mu\text{g/g}$  respecto a 184  $\mu\text{g/g}$  en la temporada de estiaje presentando diferencias significativas.

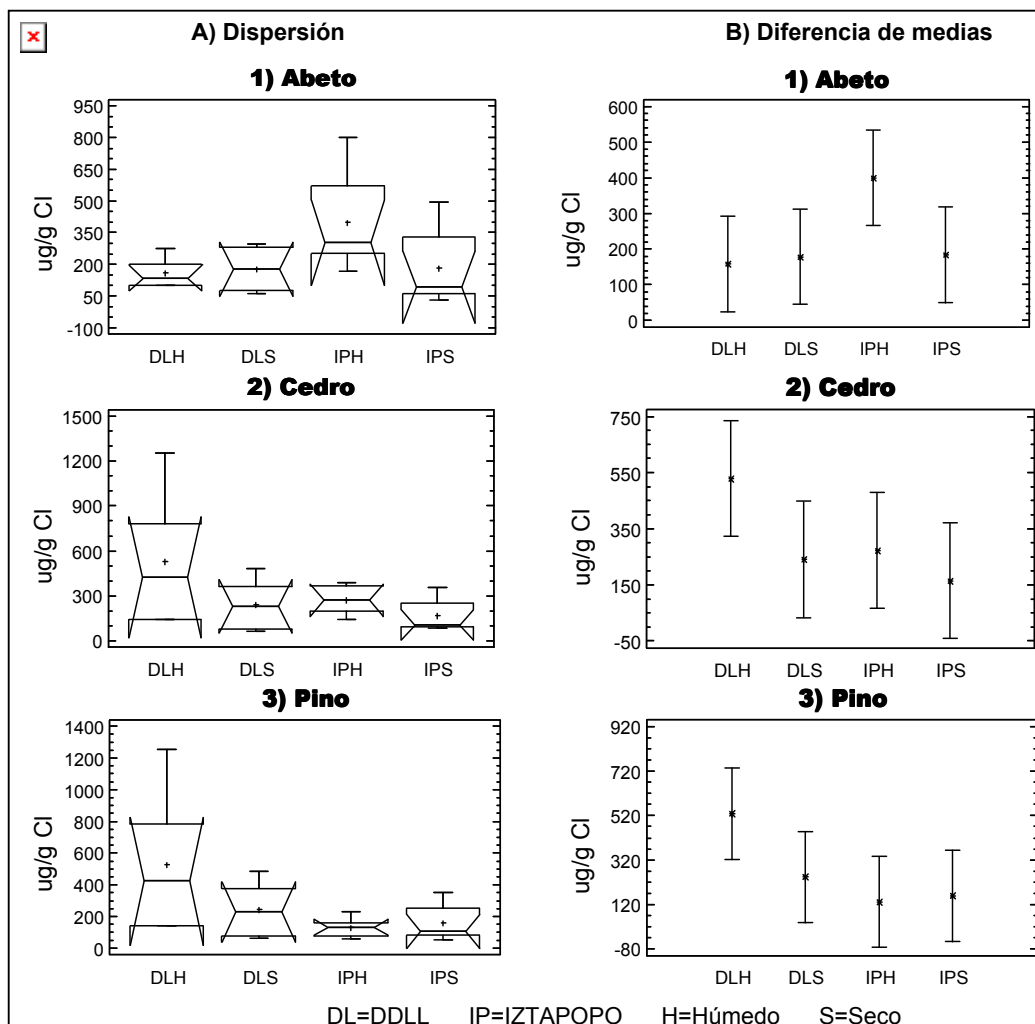


Figura 29. Análisis especie-temporal del depósito de cloruros.

En forma global la mayor depositación de cloruros se encuentra en I-P húmedo respecto a DDLL seco y húmedo, así como I-P seco.

En cedro, no se presentan diferencias significativas entre las temporadas para la misma zona (Figura 29 B2) con medias de 528  $\mu\text{g/g}$  en DDLL húmedo (DLH) y 240  $\mu\text{g/g}$  en secas, 272  $\mu\text{g/g}$  en I-P en húmedas y 164  $\mu\text{g/g}$  en secas con distribuciones bimodal en



DLH y uniforme para las demás (Figura 29 A2). Solo se presenta diferencia significativa entre DDLL húmedo (DLH) e I-P seco (IPS).

En pino se presenta un comportamiento similar al cedro con medias de 528  $\mu\text{g/g}$  en DDLL para húmedas (DLH) y 243  $\mu\text{g/g}$  en temporada seca (DLS), y para I-P de 132  $\mu\text{g/g}$  en húmedas (IPH) y 159 en secas (IPS) (Figura 29 A3) (Figura 29 B3). Se presentan diferencias significativas entre DDLL húmedo y las dos temporadas en I-P. Mostrando que en DDLL la vía de incorporación es húmeda y en I-P es indistinta

## 9.2 Evaluación de los indicadores del depósito ácido

### 9.2.1 Conductividad eléctrica

#### 9.2.1.1 Análisis Especie vs Temporada

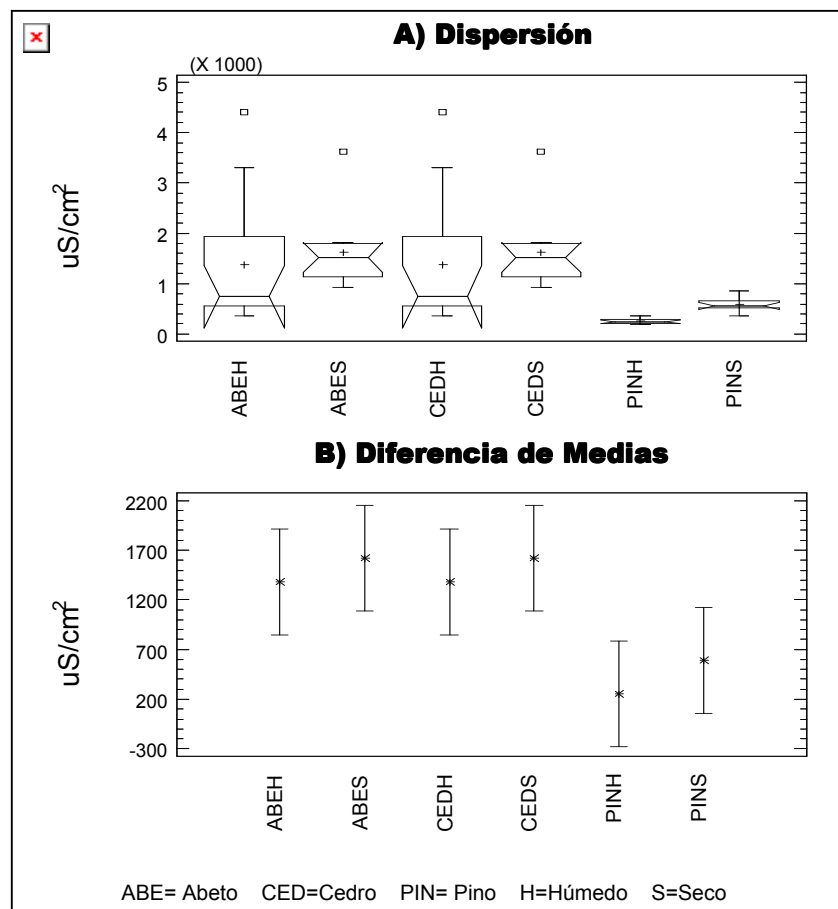


Figura 30. Análisis temporal por especie de la conductividad eléctrica

Se presentan comportamientos dispersión (Fig. 30 A) similares para cedro y abeto en ambas temporadas con medias de  $1383 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  y  $1617 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en temporada húmeda y secas respectivamente. Los diagramas de caja suelen ser muy similares entre los que representa la temporada seca y húmeda.

En términos del depósito del material particulado se determinó mayor disparidad en el registro de las especies cedro y abeto con respecto al pino, dicho comportamiento no se observó al comparar entre los periodos de muestreos secos y húmedos.

Las gráficas de diferencia de medias (Fig. 30 B) nos arrojó que ésta existe entre la especie de pino y las de oyamel y cedro. Por la amplitud del intervalo de confianza se recomienda el incremento del número de muestras.

En pino se presentan medias de  $253 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en temporada húmeda (PINH) y  $593 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en secas (PINS) que no presentan diferencias significativas entre temporadas para la especie.

### **9.2.1.2 Análisis entre especies**

El conjunto de las muestras para el registro de la conductividad eléctrica con respecto a las especies, arrojó gran dispersión (Fig. 31 A) para los casos de abeto y cedro. El pino posee una notable agrupación en torno a la media ( $\mu=400 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ), lo cual hace que en el análisis de diferencia de medias exista diferencia con respecto al abeto y al cedro ( $\mu=1600 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ).

A nivel especie, la capacidad de neutralización al depósito ácido es igual en abeto y cedro con media de  $1500 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . En pino es mucho menor con  $423 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  como consecuencia de su sensibilidad al depósito.

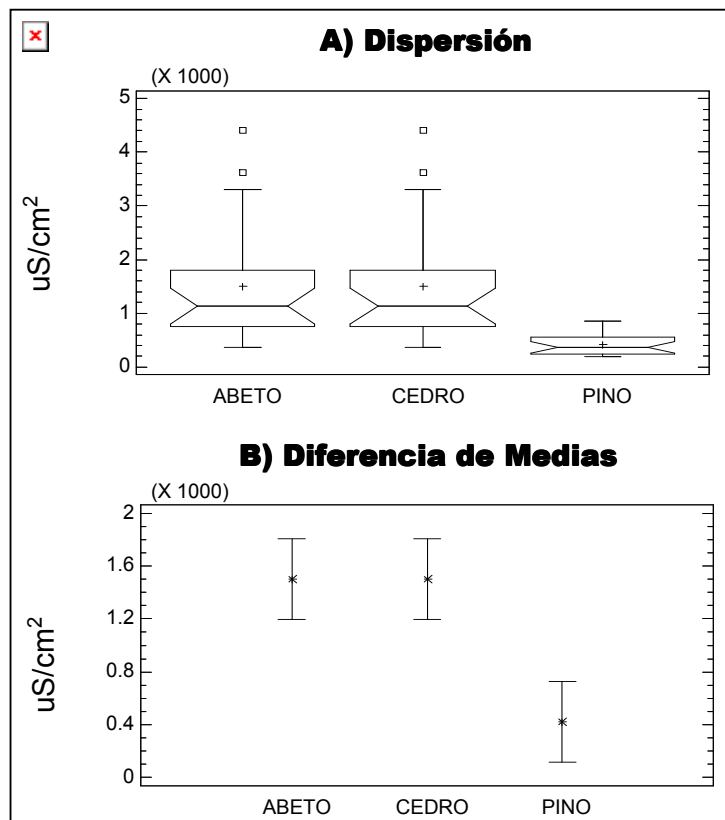


Figura 31. Análisis por especie de la conductividad eléctrica

### 9.2.1.3 Análisis Temporal

La agrupación de los registros de la conductividad eléctrica de la corteza arbórea de las tres especies (Fig. 32 A) nos muestra que existe poca dispersión entre los valores con respecto al promedio, sin embargo, la temporada de húmedas posee datos extremos, quienes son los responsables del efecto de sesgo.

Desde el punto de vista temporal se presentan diferencias significativas entre ambas temporadas con valores medios de 1006  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  para húmedas y 1276  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  en secas (Figura 32 B).

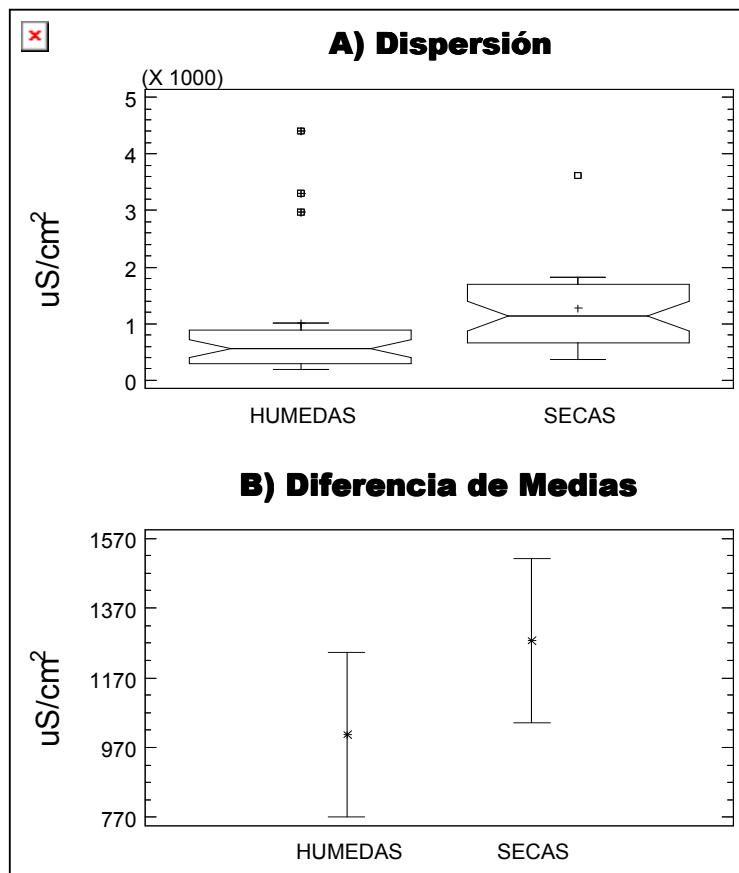


Figura 32. Análisis temporal de la conductividad eléctrica.

Lo anterior, establece que en el periodo seco se realiza una mayor neutralización en la corteza con resultado de una mayor depositación de sustancias ácidas o potencialmente ácidas en ambas zonas boscosas.

La amplitud del intervalo de confianza (95%) se ensancha con la finalidad de que la media tiene dicha certeza, a mayor amplitud de las cajas de dispersión mayor es el intervalo de confianza, por lo que se recomienda disminuirlo con el aumento del número de muestras.

En futuras investigaciones en que se requiera analizar el aporte al ecosistema por parte de partículas emitidas se hace necesario aumentar a 2 veces el tamaño del muestreo.

El PPAZCM reporta para el depósito húmedo valores entre 29.92  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  en pedregal hasta 185.7  $\mu\text{S}/\text{cm}^2$  en la estación de Felipe Angeles en la precipitación durante el año 1997, dichos valores son inferiores a los encontrados en el presente estudio debido a la que en el RAMA las lecturas que se toman son de la depositación durante la precipitación (rain out)<sup>3</sup>, sin tomar en cuenta el efecto acumulativo en el ecosistema y así nos refleja el grado de neutralización o formación de sales que se lleva en la corteza arborea.

#### 9.2.1.4 Análisis Espacial

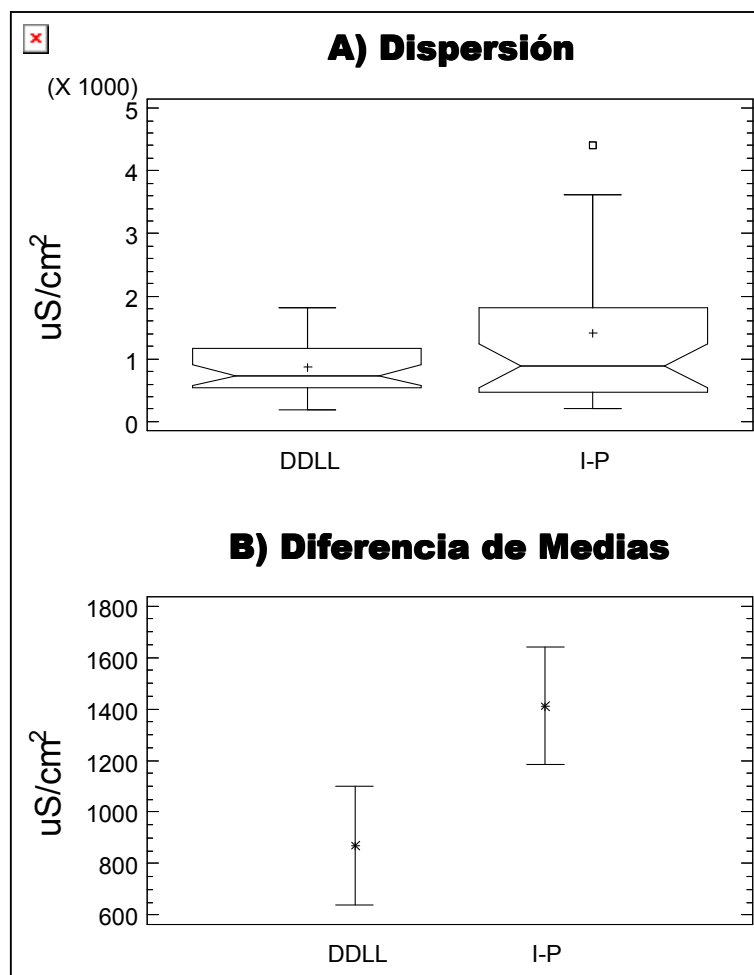


Figura 33. Análisis espacial de la conductividad eléctrica

<sup>3</sup> Para mayor información ver la sección 5.3

El depósito de material particulado expresado por el indicador conductividad eléctrica nos expresa que los iones básicos del DDLL tuvo menos dispersión con respecto a Izta-Popo. Así en DDLL es uniforme con una media de  $870 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ , respecto a I-P con valor medio de  $1412 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ . Lo anterior es resultado de una serie de factores que provocan una gran cantidad de reacciones de neutralización en la corteza de los árboles, a consecuencia de las emisiones volcánicas provenientes del Popocatepetl (Figura 33 A).

Por lo anterior, se establece diferencias significativas entre las zonas, reflejando que el mayor impacto del depósito ácido es en I-P. El PPAZMCM (1997) reporta en sus estaciones de Netzahualcoyotl, Chapingo y Lomas rangos de  $15.7$  a  $99.7 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ ,  $5.21$  a  $7.17 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  y  $3.38$  a  $6.84 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  respectivamente por método automático, por lo cual podemos establecer que la gran cantidad de los constituyentes del depósito ácido interactúan con elementos del ecosistema donde reacción siendo la corteza un reflejo del estado del mismo.

#### **9.2.1.5 Análisis Especie-Espacial**

En abeto y cedro se presentan comportamientos similares con distribuciones uniformes en DDLL para ambas temporadas, sesgada para I-P seco y normal para I-P húmedo. Con valores medios de  $724 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en DDLL húmedo (DLH) y  $1507 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en secas(DLS);  $2042 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  para I-P Húmedo (IPH)y  $1727 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en secas (IPS) (Figura 34 A1-2).

Solo se presentan diferencias significativas entre los periodos húmedos de cada zona, mostrando la misma sensibilidad al depósito ácido (Figura 34 B1-2).

En pino, se presentan diferencias significativas entre ambas temporadas en DDLL con medias de  $210.5 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  para húmedas (DLH) y  $545 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en secas (DLS). En I-P se marca una tendencia similar con medias de  $295 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  en húmedas (IPH) y  $641 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  para secas (IPS) (Figura 34 B3).

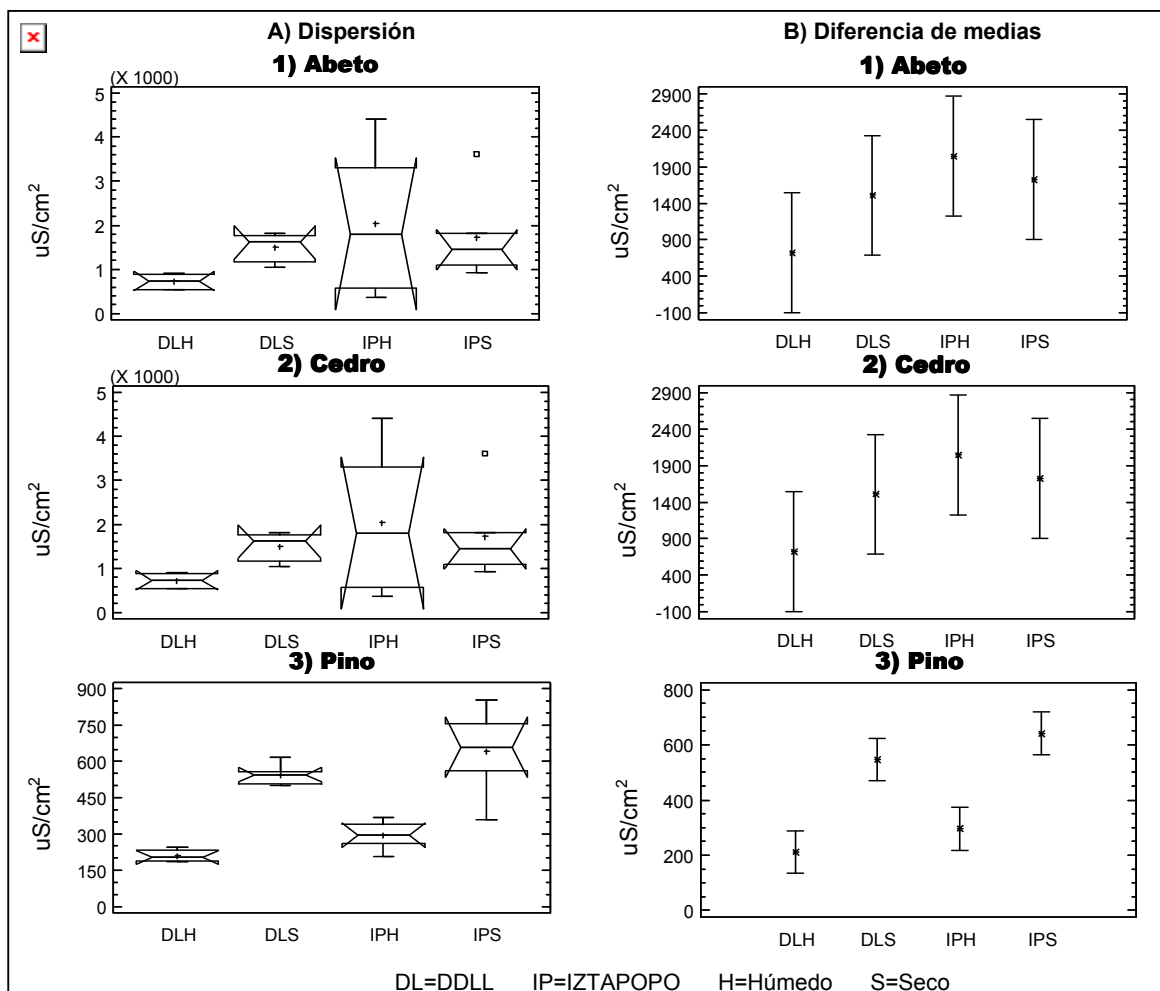


Figura 34. Análisis especie-especial de la conductividad eléctrica.

En ambas zonas se muestra un incremento en la conductividad eléctrica de la corteza en la época seca del año como resultado de una mayor depositación por vía seca (Figura 34 A3).

Cabe destacar que en los programas gubernamentales de monitoreo atmosférico solo se toma en cuenta al deposito húmedo y al total, por lo cual no hay registros de conductividad en la temporada de estiaje.

## 9.2.2 Iones Hidrónios [H<sup>+</sup>]

### 9.2.2.1 Análisis Especie vs Temporada

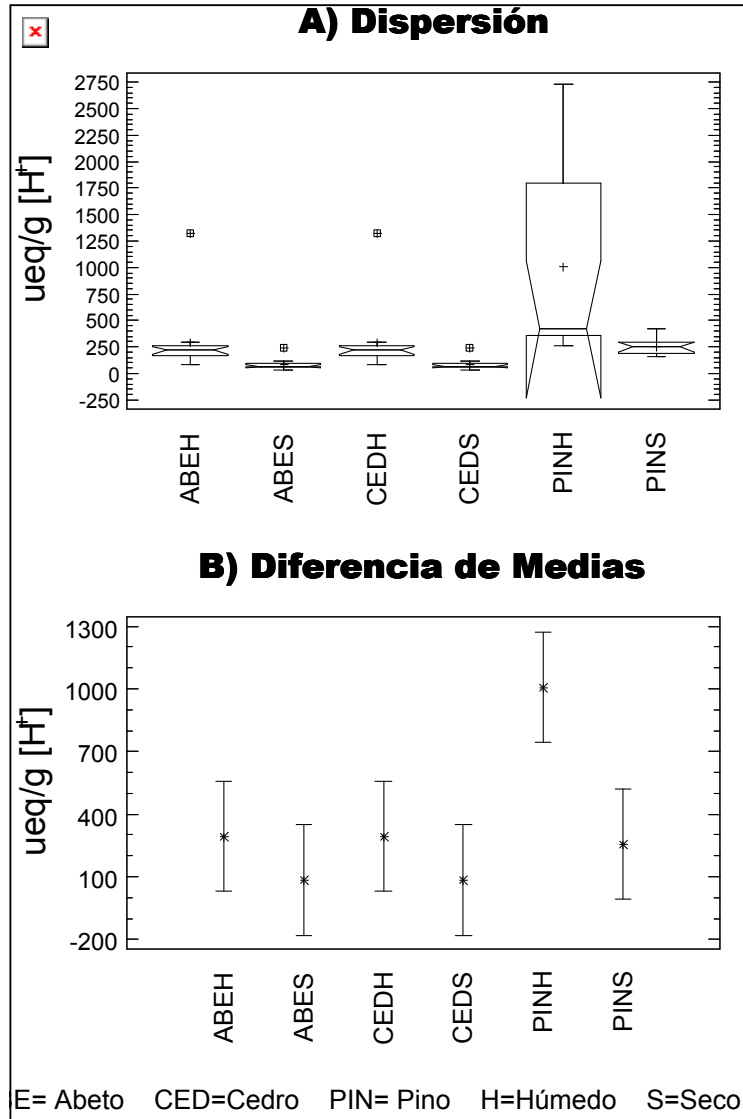


Figura 35. Análisis temporal por especie de iones hidrónios

La distribución de iones hidrónios es homogénea para todos los casos a excepción pino húmedo (PINH) que se dispersa hacia el máximo afectando la media. Lo anterior, propicia una diferencia significativa entre pino húmedo (PINH) con una media 1007 µeq/g con respecta a cedro y abeto húmedos (CEDH y ABEH) con 293 µeq/g; abeto y cedro secos (ABES y CEDS) de 83.5 µeq/g; pino seco de 255 µeq/g (Figura 35 B)



La liberación de [H+] en pino durante la temporada húmeda se debe a las sus propiedades mecánicas de la madera y a su mayor sensibilidad al depósito respecto a las otras especies que se acentúan durante los proceso de incorporación y químicos presentes en dicha temporada.

Debido al gran contenido de compuestos hidrosolubles en corteza (casi una tercera parte de su peso) como los taninos que liberan en condiciones acuosas iones hidrónos aumentando notablemente su áidez (Martin, 1969) y su dispersión en temporada húmeda En abeto y cedro su comportamiento es semejante para ambas temporadas (Figura 35A).

Por lo anterior, cabe destacar que el pino durante la temporada seca presenta comportamiento similar a las otras dos especies, en la temporada húmeda es ligeramente superior en cuanto concentración respecto a las otras especies para la misma temporada sin llegar a ser significativas estas diferencias.

Las concentraciones de hidrónios son menores a las reportadas por Calva (1999) para las mismas especies.

#### **9.2.2.2 Análisis entre Especies**

La mayor sensibilidad a la bioacumulación se presenta en pino con una media de 631.5  $\mu\text{g/g}$ , con una distribución compacta con valores aberrantes de 1000, 2400, 2500 y 2800  $\mu\text{g/g}$  en esta especie podría deberse a la mayor disociación de los diferentes iones que conforman el depósito atmosférico como consecuencia de las propiedades mecánicas de la corteza (Figura 36 A).

En abeto y cedro, presentan comportamientos semejantes con medias de 188  $\mu\text{eq/g}$  y un evento aberrante de 1350  $\mu\text{eq/g}$ .

Otro factor que incide en las diferencias significativas presentes entre pino respecto a cedro y abeto es la mayor liberación de iones hidrónios durante la temporada húmeda lo que indica una mayor dinámica en el proceso y captación del depósito (Figura 36 B).

La movilidad de los elementos en el suelo forestal se ve influenciado por la acidez del suelo, la cual depende de la geología y de las especies vegetales acidófilas y acidofílicas; al descomponerse las hojas y ramas (biomasa) mejor conocida como humus, en conjunto con los elementos de régimen climático, van incorporándose al ciclo biogeoquímico. La corteza al actuar como esponjas que atrapan las partículas de la atmósfera, incorpora más elementos al proceso<sup>4</sup>.

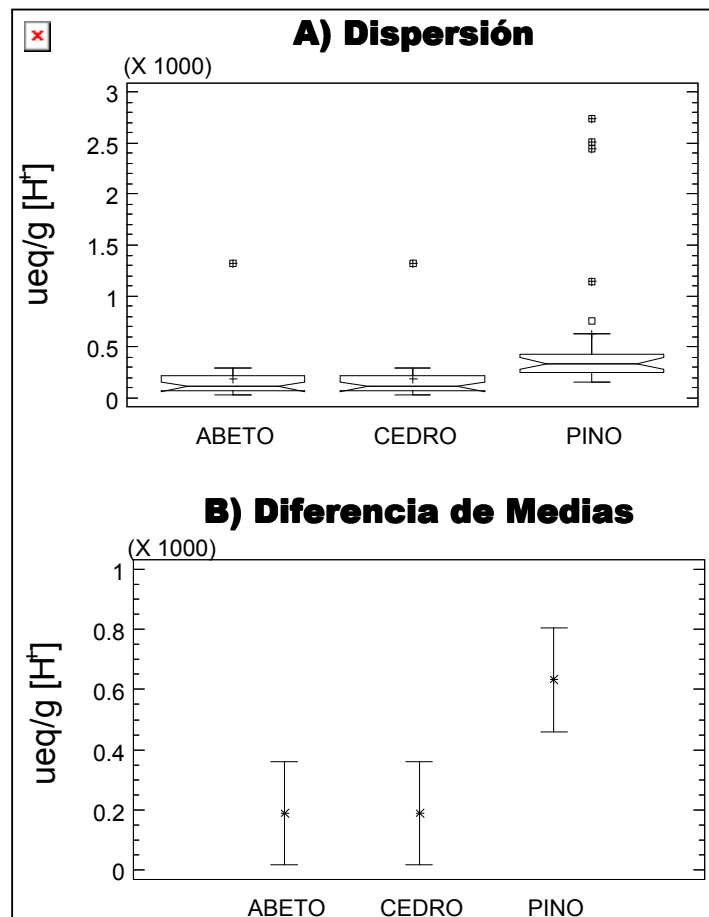


Figura 36. Análisis por especie de iones hidrónios

<sup>4</sup> Para mayor información ver la sección 5.2 y 5.3

### 9.2.2.3 Análisis Temporal

La [H<sup>+</sup>] presenta una mayor dispersión con una distribución más amplia para la temporada húmeda con una media de 531  $\mu\text{eq/g}$  respecto a DDLL con 141  $\mu\text{eq/g}$ , que se ve reflejado en los eventos aberrantes presentes solo en esta temporada (Figura 37 A1)

Lo anterior se debe a la mayor disociación e incorporación de los diferentes iones del depósito bajo condiciones de humedad, destacando que dicho depósito se realiza principalmente en forma particulada y no en aerosol, provocando las diferencias significativas entre las temporadas (Figura 37 B)

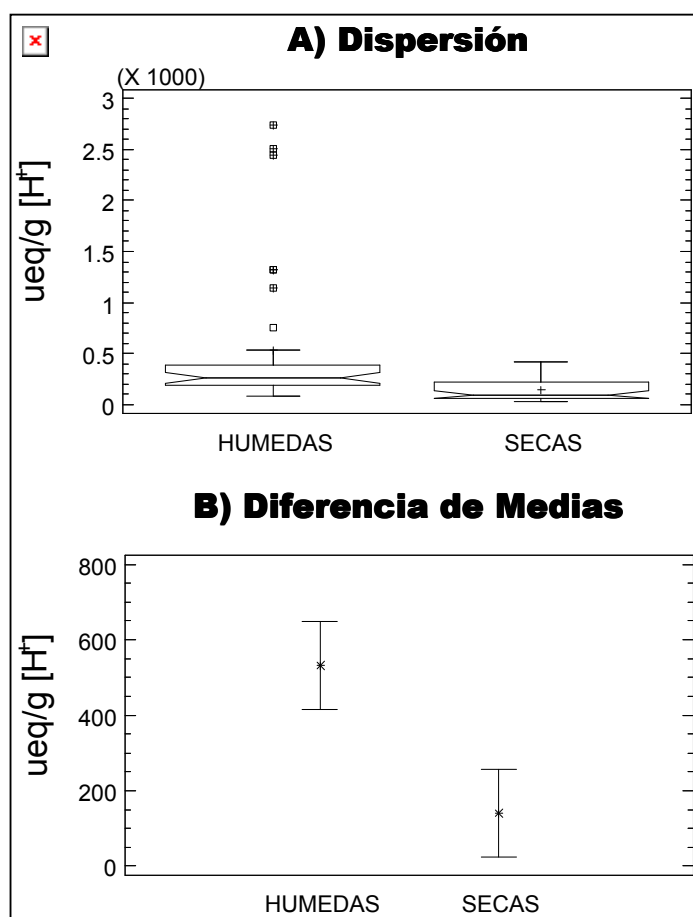


Figura 37. Análisis temporal de los iones hidronios

Dicha ruta implica que los fenómenos de condensación y nucleación de las partículas son los principales rutas de captación del depósito que al entrar en contacto con el dosel del arbolado lixivia los iones presentes en las hojas enriqueciendo el proceso de escurrentia en el fuste (Stemflow).

#### 9.2.2.4 Análisis Espacial

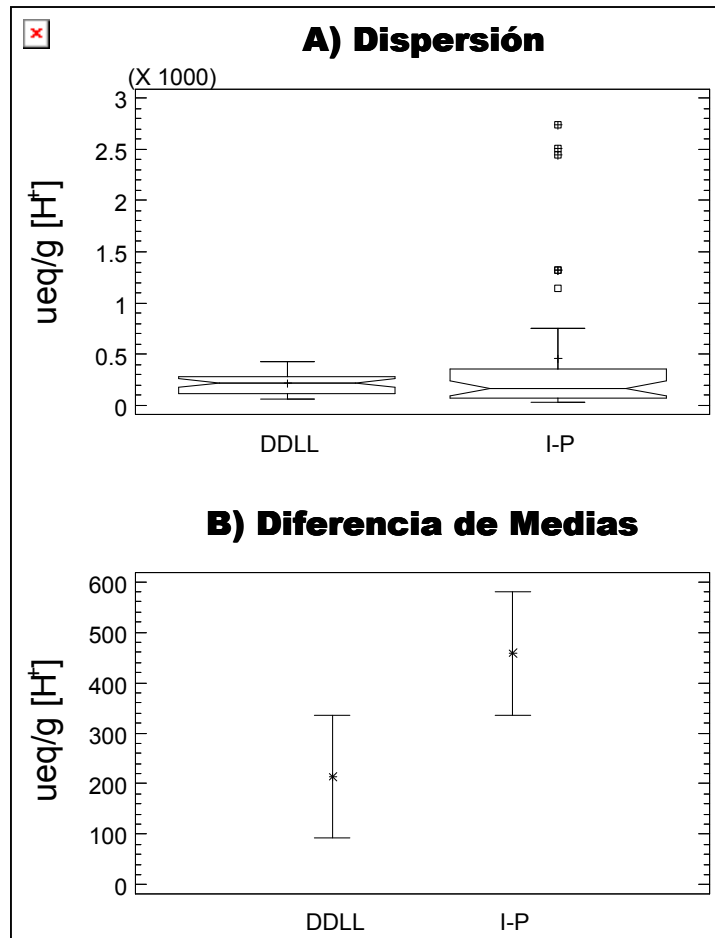


Figura 38. Análisis Temporal de los iones hidronios

La liberación de iones hidronio es mayor en I-P con una media de 458  $\mu\text{eq/g}$  respecto a 214  $\mu\text{eq/g}$  de DDLL reflejando una mayor protonización del ecosistema, así como un mayor deterioro del ecosistema mostrado en las diferencias significativas (Figura 38 B).

Lo anterior, se debe a las emisiones continuas durante el periodo de muestreo del volcán Popocatepetl que se ve reflejado en los valores aberrantes de 1100, 1350, 2400,

2500 y 2800  $\mu\text{eq/g}$  en I-P. Lo que acentúa los procesos de captación e incorporación del depósito atmosférico.

Sin embargo, sus dispersiones son compactas pero con la excepción de cinco valores extremos en I-P que se deben a la actividad del volcán.

Los presentes resultados son semejantes a los obtenidos por Calva (1999), e indican una mayor grado de protonización para I-P a causa de la afectación del volcán, así como de las emisiones de origen antrópico provenientes de la ZMCM y poblaciones aledañas.

#### **9.2.2.5 Análisis Especie-Espacial**

En abeto y cedro se presentan comportamientos similares para la  $[\text{H}^+]$  sin presentar diferencias significativas entre los grupos con medias de 240.5  $\mu\text{eq/g}$  DDLL en húmedo (DLH), 112  $\mu\text{eq/g}$  DDLL en seco (DLS), 345  $\mu\text{eq/g}$  I-P en húmedo (IPH) y 55 I-P (IPS) en seco; como consecuencia de un número de muestra reducido para este análisis (Figura 39 B1-2).

En pino, se presentan diferencias significativas entre IPH (1640  $\mu\text{eq/g}$ ) y los otros tres grupos (374  $\mu\text{eq/g}$  DLH, 206  $\mu\text{eq/g}$  DLS y 305  $\mu\text{eq/g}$  IPS), que se ve reflejado en una distribución homogénea más amplia para IPH (Figura 39 B3)

Así mismo, la dispersión en abeto y cedro es compacta mostrando un ligero aumento en depósito durante la temporada húmeda para ambas zonas (Figura 39 A1-2). En pino resalta la amplia distribución de I-P en húmedas (IPH) reflejando un grado mucho mayor de impacto del depósito ácido y protonización del ecosistema (Figura 34 A3)

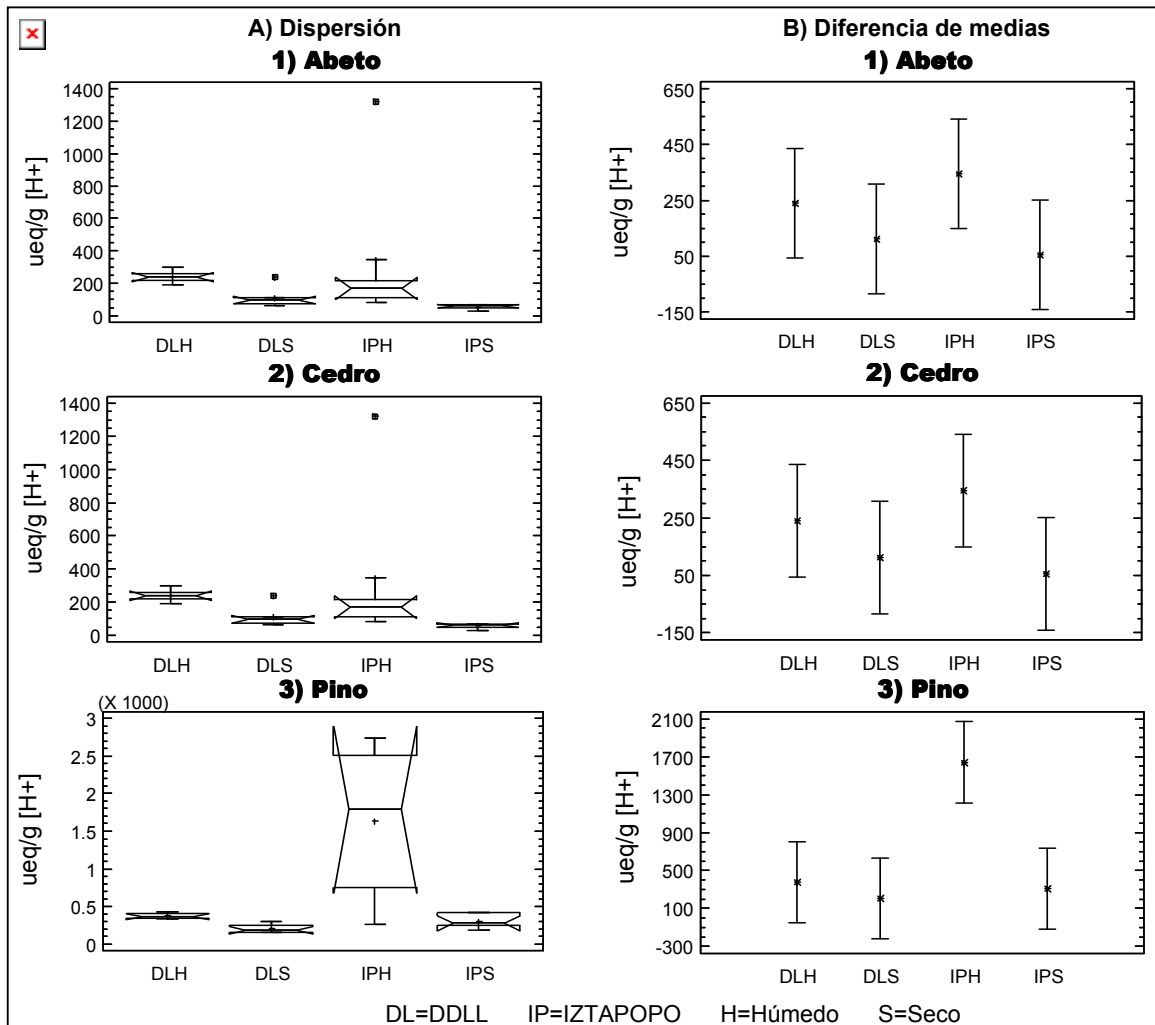


Figura 39. Análisis especie-espacial de los iones hidrónicos.

## 9.2.3 Potencial de Hidrógeno

### 9.2.3.1 Análisis Especie vs Temporada

La distribución del pH en cedro y abeto son compactas para ambas temporadas con un ligero disminución durante la temporada seca (CEDS y ABES), pino en seco (PINS), la temporada húmeda presenta una mayor distribución para esta última especie (Figura 40 A).

En el análisis de diferencia de medias se forman 3 grupos que presentan diferencias significativas entre sí: abeto y cedro en seco (CEDS y ABES) (4.1), abeto, cedro en húmedo (CEDH y ABEH) y pino en seco (3.6), y pino en húmedo (3.2) (Figura 40 B).

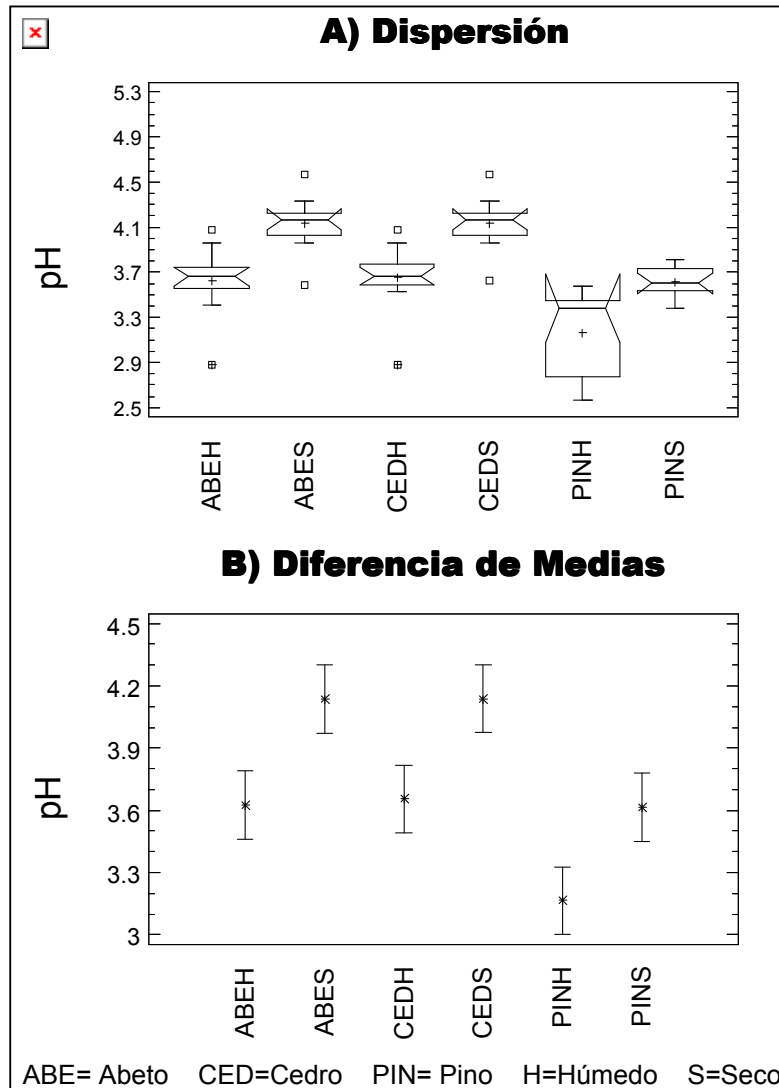


Figura 40. Análisis temporal por especie del pH

Este parametro es muy importan al ser el desencadenante de la movilidad y sinergismo entre los diferentes elementos y un buen parámetro de la salud del ecosistema. De acuerdo a la literatura, los valores de ph en el presente estudio se encuentran en el rango donde elementos como aluminio, mercurio, plomo entre otros aumentan su

movilidad provocando un efecto antagónico con micro y macronutrientes como el hierro, magnesio y calcio (Evans, 1981).

Lo anterior, conlleva un estrés al árbol debido a la falta de elementos importantes en diferentes procesos fisiológicos, permitiendo la entrada de agentes patógenos como hongos, insectos y virus en detrimento del vigor del árbol (Schütt and Cowling, 1985).

### **9.2.3.2 Análisis entre Especies**

La especie con mayor sensibilidad al depósito es pino con una media de pH de 3.39 y tres valores aberrantes de 2.6, 2.7 y 3.0, con una distribución homogénea si como más cerrada en comparativa con abeto y cedro

Abeto y cedro presentan una mayor dispersión que pino con medias de 3.87 y 3.89 respectivamente (Figura 41 A). Dicho comportamiento obedece a la mayor capacidad de amortiguamiento en ambas especies respecto al pino. Cabe señalar que las tres especies se encuentran en un grado de protonización debido a que los valores de acidez se encuentran en la franja de movilidad de los elementos tóxicos (Aluminio, cadmio, manganeso, entre otros) para el arbolado, que al encontrarse disponibles para el árbol provocan antagonismo y sinergismo con otros elementos importante para su crecimiento (Evans, 1981, Kuylenstierna, 1995).

El incremento de la acidez en pino es una consecuencia del impacto del depósito de nitratos en esta especie en particular



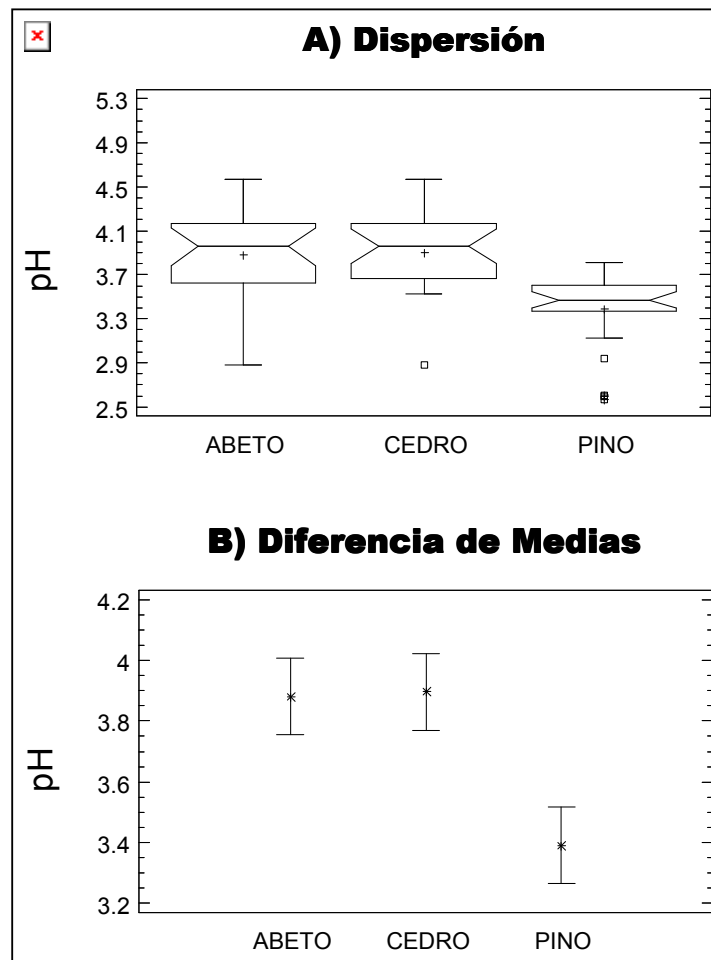


Figura 41. Análisis por especie del pH

### 9.2.3.3 Análisis Temporal

La acidez presenta diferencias significativas entre las zonas con medias de 3.48 para la temporada húmeda y 3.96 para la seca (Figura 42 B). Las dispersiones de la distribución es homogénea para ambas temporadas, sin embargo en el caso de la temporada húmeda presenta cuatro valores aberrantes de pH, tales como: 2.55, 2.6, 2.8 y 2.9 (Figura 42 A).

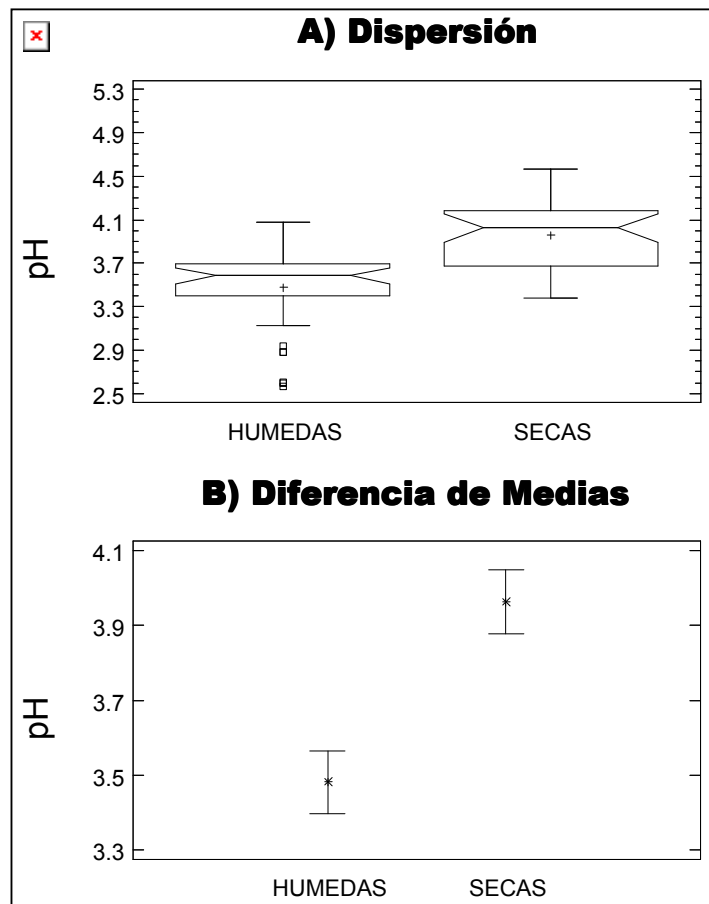


Figura 42. Análisis temporal del pH

Por lo anterior, la temporada húmeda presenta un mayor grado de acidificación que la seca, a consecuencia de la depositación de las diferentes partículas contaminantes se impactan e incorporan en condiciones húmedas preferentemente.

Destaca en los presentes resultados que en ambas temporadas que los valores medios para ambas temporadas son presentan una fuerte acidez, lo cual es una referencia de el grado de protonización presente en los ecosistemas forestales para ambas zonas de estudio, dentro de estos valores se liberan una gran cantidad de iones de elementos tóxicos para el arbolado y se impide la entrada de otro elementos esenciales para el mismo<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Para mayor información ver la sección 5.3

#### 9.2.3.4 Análisis Espacial

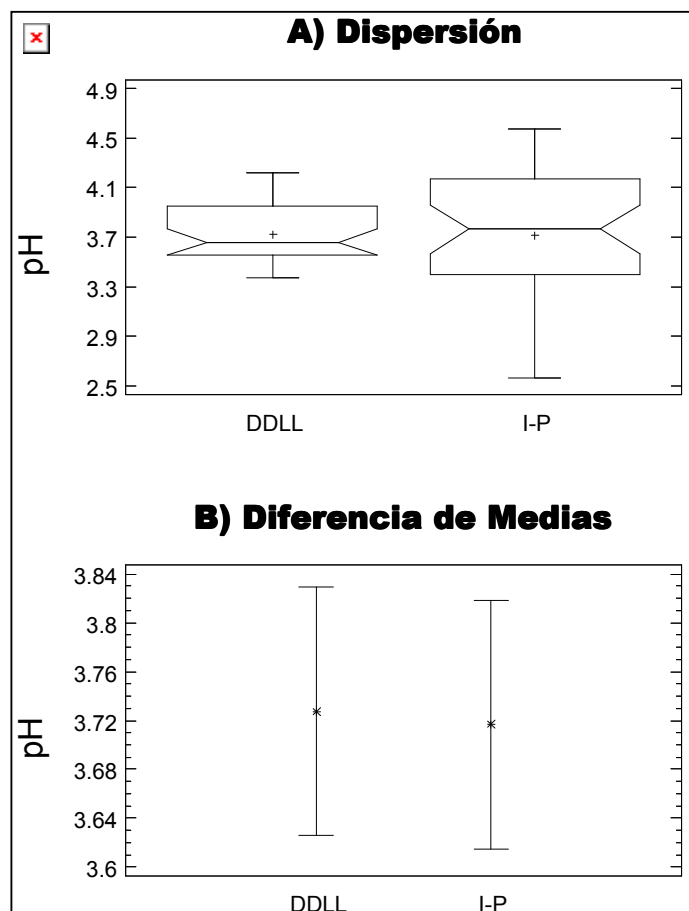


Figura 43. Análisis espacial del pH

La acidez no presentó diferencias significativas entre las zonas con medias de 3.72 y 3.71 para DDLL e I-P respectivamente (Figura 43 B)

Por lo anterior, se puede establecer que ambas zonas presentan el mismo grado de protonización, pero con causas diferentes.

El grado de acidificación en DDLL se debe a la gran cantidad de emisiones que se depositan en la zona provenientes de la ZMCM durante 9 meses al año por la disposición de los vientos en el Valle de México. Para I-P el grado de acidificación se acentúa con las emisiones del Volcán Popocatepetl, que durante el período comprendido de agosto de 1996 a a marzo 1998 incremento considerablemente su

actividad emitiendo gases ricos en SO<sub>x</sub> NO<sub>x</sub> y diversos compuestos clorados que contribuyen a la acidez en la zona.

Asi como los valores similares o más bajos de acidez del presente estudio con relación al los reportados por Paramo, 1977; PPAZMCM 1997; entre otros.

### 9.2.3.5 Análisis Especie-Espacial

Abeto y cedro presentan comportamiento similares para la acidez, con diferencias significativas entre IPS (3.62) y los otros tres grupos con medias de 3.62 para la temporada húmeda en ambas zonas (DLH y IPH) con una marcado incremento en la acidez respecto a la temporada seca en ambas zonas, finalmente DLS con 3.99. (Figura 44 B1-2).

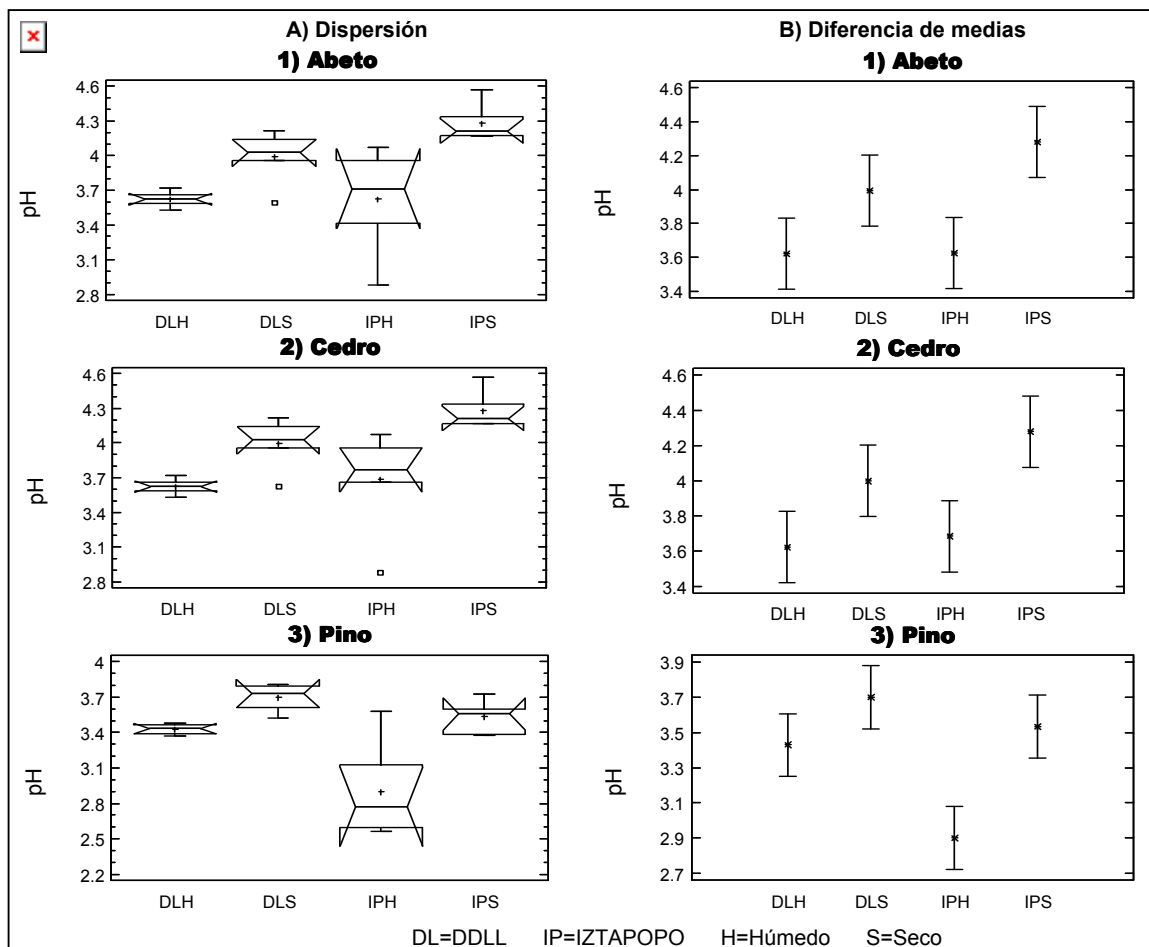


Figura 44. Análisis especie-espacial del pH

En las distribuciones para los grupos DLH, DLS e IPS presentan dispersiones homogéneas y mas cerradas en comparación con IPH, en el caso particular del abeto presenta mas amplia que en cedro, como resultado de la mayor depositación de sulfatos en esta especie en específico (Figura 44 A1-2).

En pino se presentan medias de 3.42 para DLH, 3.69 en DLS, 2.90 para IPH y 3.53 en IPS, la mayor acidez que se presenta en IPH indica que la ruta de incorporación de los contaminantes es principalmente húmeda mientras que en las otras dos especies la ruta de incorporación es seca, con diferencias significativas entre IPH con respecto a los demás factores (Figura 44 B3).

## X. CONCLUSIONES

---

- La corteza arbórea es un biomonitor sensible que permite conocer el estado del depósito atmosférico del ecosistema, y permite establecer el estado del ecosistema de manera eficaz y a un bajo costo.
- La técnica de ion selectivo es sensible para cuantificar sulfatos, cloruros y nitratos en extractos acuosos de corteza arbórea.
- Las propiedades físicas de la corteza, diferentes en cada una de las especies, fueron determinantes para el registro y la acumulación de los iones, en conjunto con humedad, temperatura y época del año.
- El aporte de sulfatos, cloruros y nitratos a la protonización del ecosistema fue determinante por vía seca.
- El depósito atmosférico en I-P y DDLL fue homogéneo cuantitativamente y cualitativamente.
- En orden decreciente se determinó que la sensibilidad de las especies para el biomonitoreo fue pino>abeto>cedro.
  - El oyamel es el biomonitor sensible para sulfatos.
  - El pino es el biomonitor sensible para nitratos.
  - No se determinó un biomonitor sensible para cloruros.
- El DDLL presentó mayor depósito de cloruros y nitratos con respecto al I-P, todas especies.
- El período húmedo presenta mayor depósito de cloruros con respecto al seco, ambas zonas y todas especies.
- El período seco presenta mayor depósito de nitratos con respecto al húmedo, ambas zonas y todas especies.
- I-P presenta una mayor protonización del ecosistema, todas especies.
- El período húmedo fue el de mayor aporte en acidez con respecto al seco, considerando ambas zonas y todas especies.
- El depósito de sulfatos es similar en intensidad en ambas zonas.
- La temporada seca es la de mayor aporte de nitratos al ecosistema.

- Es necesario aumentar el tamaño de muestra en próximos estudios para poder determinar diferencias significativas en los análisis que por falta de un mayor número no se concluyo satisfactoriamente.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

---

- Alvarado, R. D., L. I. de Bauer and J. Galindo, 1993. Decline of Sacred Fir (*Abies religiosa*) in a Forest park South of Mexico City. *Environmental Pollution* 80:115-121
- APHA, AWWA and WMO (American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. 1993. Standard methods for the examination for water. APHA, AWWA and WPCF. Washington. 1195p.
- Báez, A. P. and R. Belmont. 1987. Comparative Study of the Chemical Composition of Rain of Three Different Zones in Mexico. *Contaminación Ambiental*. 3:25-36.
- Báez, P. A., Belmont, D. R. y Padilla. 1993. Variation of chemical composition of wet precipitation, using a sequential sampling urban-rural areas comparison. *Atmosfera* 6:163.174.
- Báez, A. Belmont, R. Azara, E. Torres, M. y Padilla, H. 1997. Cloudwater and precipitation chemistry at Popocatepetl volcano: a high elevation site. *J. Environment. Quality* 26:253-258.
- Bormann, F. H., 1982. The Effects of the Air Pollution on the New England Landscape. *Ambio* 11:4:338-346.
- Calva, V. G. y R. C. B Corona, 1989. Contaminación Atmosférica en la Ciudad de México: Causas, Concentraciones y Efectos. *Tópicos de Investigación y Posgrado*. 1:1:10-21.
- Calva, V. G. y R. C. Corona, 1990. Los Vegetales Potencialmente Útiles para el Registro de los Niveles de Contaminación en el D. F. *Tópicos de Investigación y Posgrado*. 1:3:3-20.
- Calvert, J., A. Lazrus, G. Kok, B. Heikes, J. Walega, J. Lind and C. Cantrell, 1985. Chemical Mechanisms of Acid Generation in the Troposphere. *Nature* 317:27-35.
- Cassens, D. L., 1974. Bark properties of eight Western Softwoods. *Forest Products Journal* 4:24:40-45.
- Chataway, M. M. 1953. The Anatomy of Bark. I. The genus *Eucalyptus*. *Austral. J. Bot.* 1:402-433.



- Chataway, M. M. 1955. V. *Eucalyptus* Species with Stringy Bark. Austral. J. Bot. 3:165-169.
- Cowling E. B. and P. Schütt, 1985. Waldsterben, a General Decline of Forest in Central Europe: Symptoms, Development and Possible Causes. Plant Disease. 69:7:548-558.
- Durham, J. L. and K. L. Demerjian, 1985. Atmospheric Acidification Chemistry: A Review. In Adams, D. P. and P. Walter. Acid Deposition -Environmental, Economic and Policy Issues- Ed. Plenum Press. New York, USA. 17-30 pp.
- Esau, K., 1985. Anatomía Vegetal. 3a Edición. Editorial Omega. Barcelona, España. 512 pp
- Evans, L., G. Hendrey, G. Stensland, D. Johnson, and A. Francis, 1981. Acidic precipitation: Considerations for an Air Quality Standard. Water, Air and Soil Pollution 16:469-509.
- Excurra, E. 1992. De las chinampas a la megalópolis. El medio ambiente en la cuenca de México. Colección La ciencia para todos. No. 91. SEP. Fondo de Cultura Económica. CONACyT. México. 112pp.
- Franzle, O. 1993. Contaminants in terrestrial environments. Springer series in physical Environment 13. Springer-Verlag. Alemania.
- Fenn, M. E., L. I. De Bauer, A. Quevedo-Nolasco y C. Rodríguez-Frausto, 1999. Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. Water, Air and Soil Pollution 113:155-174.
- Galindo, I. 1989. Transformaciones energéticas en la atmósfera urbana originadas por la contaminación atmosférica. En: Gio-Argaez, R., I Hernández-Ruíz, E. Sáinz-Hernández (eds). Ecología Urbana. Edición especial de la Sociedad de Historia Natural.
- Galloway, J. N. y G.G. Parker, 1980. Difficulties in measuring wet and dry deposition on forest canopies and soil surface. *In*: Effects of acid precipitation on terrestrial ecosystems. Hutchinson T. C. y M. Havas (eds.). NATO Scientific Affairs Division. New York. 564 pp.

- Granat, L. 1972. On the relation between pH and the chemical composition in atmospheric precipitation. *Tellus* 24:550-560.
- Grether, D. 1977. The effects of a high- Stack Coal-burning Power Plant on the relative pH of the Superficial Bark of Hardwood Trees. *Water, Air and Soil Pollution* 7:913-918.
- Grodzinska, K. 1971. Acidification of tree bark as a measure of air pollution in southern Poland. *Bulletin Acad. Pol. Sci. Cl.* 19:189-195.
- Grodzinska, G., 1977. Acity of Tree Bark as a Bioindicator of Forest Pollution in Southern Poland. *Water, Air and Soil Pollution* 8:3-7.
- Grodzinska, K. 1979. Tree bark- sensitive biotest environment acidification. *Environment International* 2:173-176.
- Grodzinska K. 1980. Zanieczyszczenic polskich parkow narodowych metalami ciezkimi. *Ochrona Przyrody* 43:9-27.
- Grodzinska, K. 1982. Monitoring of air pollutants by mosses and tree bark. *In: Stemberg, I. Y H. J. Jager (eds.). Monitoring of air pollutants by plants. Dr. W. Junk Publishers. The Hague. Pp. 33-44.*
- Härtell, O. y Grill, D. 1972. Die leitfähigkeit von fichtenborkenextraken als empindlicher indicator für luftverunreinigungen. *European Journal of Forest Pathology* 2(5): 205-215.
- Härtell, G., 1982. Pollutants Accumulation by Bark. *In Monitoring of Air Pollutants by Plants. Methods and Problems. Ed. I. Stemberg and H. J. Jäger. Proceeding of the International Workshoop, Osnabrtck (FRG). 137-148 pp.*
- Haygreen, J. G. y J. L. Bowyer, 1982. *Forest products and wood science: An introduction. The Iowa State University Press/AMES. E. U. A. 495pp.*
- Henrichsen, D. 1987. The Forest Decline Enyigma. *Bioscience* 37:8:542
- Hutchinson, T. C. and M. Havas, 1978. *Effects of the Acid Precipitation on Terrestrial Ecosystems. Plenum Publishing Corporation. New York, USA.*
- Hutchinson, T. C. y H. Havas, 1980. *Effect of acid precipitation on terrestrial ecosystems. NATO. New York. 654pp.*
- Isenberg, I. H. 1943. The anatomy of redwood bark. *Madroño* 7:85-91.

- Jaramillo, V. 1994. El Cambio Global: Interacciones de la Biota y la Atmósfera. *Ciencias* 35:4-14.
- Jáuregui, O. E. 1989. The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*. 9:169-180.
- Johnsen I. y U. Schoting. 1973. Influence of air pollution on the epiphytic lichen vegetation and bark properties of deciduous trees in the Copenhagen area. *Oikos* 24:344-351.
- Kaziol, M. J., y F. R. Whatley, 1984. Gaseous air pollutants and plant metabolism. Butterworths. pp.415
- Klein, R. M. and T. D. Perkins, 1987. Cascades of Causes and Effects of Forest Decline. *Ambio* 16:2-3:86-93
- Kreiner, W. (1986). Sulfur dioxide contribution to the analyses of some soluble components of bark including a comparison of bark of deciduous trees and conifers influenced by sulfur dioxide. *Phyton* 26(1): 77-91.
- Krugy, C. and J. Issacson, 1984. Comparison of Water and Dilute Acid Treatment on organic and Inorganic Chemistry to Leachate from Organic-Rich Horizons of an Acid Forest Soil. *Soil Science* 5:137:370-378.
- Krupa, S. V., 1977. Impacted of air pollutants on terrestrial vegetation (ozone, sulfur dioxide, acidic rain, acid aerosols and fluorides). Department of Plant Pathology. University of Minnesota. Minneapolis, U.S.A. 52-96 pp
- Kuylenstierna, J. C. I., H. Cambridge, S. Cinderby and M. J. Chadwick, 1995. Terrestrial Ecosystems to Acidic Deposition in Developing Countries. *Water, Air and Soil Pollution* 85:2319-2324
- Lötschert, W. and H. J. Köhm, 1977. Characteristics of Tree Bark as a Indicator in High-Inmission Areas. *Oecologia* 27:47-64.
- Luna R. R. 1997. Sotobosque de Oyamel y Deposición Acida en el Desierto de los Leones e Iztapopo. Servicio Social (Biología). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).
- Martin, R. E. and G. R. Gray, 1971. pH of southern pine barks. *Forest Products Journal*. 3:21:49-52.

- Melo, G. C., 1978. Ensayo Metodológico para la Planificación del Parque Nacional Desierto de los Leones, D. F. Tesis de Maestría. Facultad de Filosofía y Letras. Colegio de Geografía (UNAM).
- Melo, G. C. and O. Oropeza, 1980. Plan de Manejo para la Protección y el Uso del Parque Nacional Desierto de los Leones. México, D. F., Anuario de Geografía. Facultad de Filosofía y Letras (UNAM). México, D. F. 275-287.
- Miranda, J., Morales, J. R., Cahil, T. A., Aldape, F. y J. Flores, 1992. A study of elemental contents in atmospheric aerosols in Mexico City. *Atmósfera* 5:95-108.
- Nuemann, M. 1993. Forest Damage Assessment in Austria. *Environmental Monitoring and Assessment* 28:183-188.
- Oden, S. 1968 Nederbördens försuring – ett allvarligt miljöhö. In M. Lagerkvist (ed.), *Hotet mot miljön*, pp. 117-128. Stockholm
- Oden S. 1976. The acidity problem, an outline concept. *Water, air and soil pollution*. 6:137-166.
- Páramo *et. al.*, 1987. Acidez de las precipitaciones en el D. F. *Ciencia y Desarrollo* 12:(72):59-65
- Páramo, V. H., M. A. Guerrero, M. A. Morales, R. E. Morales and C. D. Báez, 1987. Acidez de las Precipitaciones en el Distrito Federal. *Ciencia y Desarrollo* 72:56-65.
- Padilla-Gordon, H. Belmont, D. R. Torres, B. M. C. Garcia M. R., Báez-Pedrajo, A. 1996. A field comparison of cloud water collectors in a mountainous region under low win speed conditions in eastern Mexico. *Atmósfera* 9:189-199.
- Pérez, V. M. L. 1996. Cuantificación de la Acidez edáfica en la Zona de Villa del Carbón, Estado de México. Servicio Social (Biología) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).
- Pfeiffer , H. 1928. Die pflanzlichen trennungsgewebe. *In: Linsbauer, K. Handbuch der pflanzenanatomie*. Band 5. Lief 22.
- Prinz. B. 1985 Effects of air pollution on forest. *Air pollution control association*. 35(9): 903-915.
- PPAZMCM (Programa Precipitaciones Acidas en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México).1997. Informe anual 1997. Dirección General de Prevención y Control de

la Contaminación. Dirección de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A.). Secretaría del Medio Ambiente. 59 p.

- Rampazzo, N. and W. E. H. Blum, 1992. Changes in Chemistry and Mineralogy of forest Soils by Acid Rain. *Water, Air and Soil Pollution* 61:209-220.
- Raunemaa, T., P. Hari, J. Kukkonen, M. Kulmala and Karshula, 1987. Analysis of the Bark of Scots Pine as a Method of Studying Environmental Changes. *Water, Air and Soil Pollution* 32:445-453.
- Rehfuess, K. E. 1983. Walderkrankungen und Inmisionen –eine Zwischenbilanz. *Allg Forstzeitschr* 38:601-610
- Robitalle, G., F. Leblanc, and R. N. Rao, 1977. Acid Rain a Factor Contributing to Paucity of Epiphytic Cryptogams in the Vicinity of a Cupper Smeller. *Rev. Bryol. Lichenol.* 43:1:53-56.
- Saavedra, L. L., 1993. Monitoreo de la Deposición Acida con Corteza Arbórea Perennifolia en el Parque Nacional Desierto de los Leones. Servicio Social (Biología). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).
- Saavedra, L. L. 1996. Análisis Espacio-Temporal de la Deposición Acida, Utilizando como Biomonitor de Exposición la Corteza Arbórea de Especies Perennes del Parque nacional Desierto de los Leones. Tesis de Licenciatura (Biología). Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).
- Salazar, S., J. L Bravo y M. A. Castellanos. 1989. Identificación de la fracción mineral del aerosol atmosférico en la zona urbana de la Ciudad de México por medio de difracción y fluorescencia de rayos x. *Atmósfera* 2:(2):103-110
- Santamaría, J. M. y Martin, A. 1997. The bark as a bioindicador of air pollution in Navarra, Spain. *Water, Air and Soil Pollution* 98(3-4):381-387.
- Schulze, E. D., 1989. Air Pollution and Forest Decline in a Spruce (*Picea abies*) Forest. *Science* 244:776-783.
- Secretaría del Medio Ambiente, 1997. Informe Anual de la Calidad del Aire en el Valle de México. Gobierno del Distrito Federal (G.D.F.). México, D. F.
- Seinfeld, J. H. 1986. Atmospheric chemistry and physics of air pollution. John Wiley & Sons. New York. E. U. A. 738pp.

- Sequeira, R. 1981. Acid rain: Some preliminary results from global data analysis. *Geophysical Research Letters*. 8(2):147-150.
- Sequeira, R. 1982. Acid rain: An assessment based on acid base considerations. *JAPCA* 32(3):241-245.
- Skye, E. 1969. Lichens and air pollution. *Acta Phytogeographica suecica*. 52:1-123.
- Snell, F. D. and C. T. Snell. 1949. *Colorimetric methods of analysis; including some turbidimetric and nephelometric methods*. Van Nostrand. New York, USA.
- Soto, T. J. A., 1996. Estimación de la Deposición Acida en Tres Parques Urbanos del D. F. Tesis de Licenciatura (Biología) Facultad de Estudios Superiores Zaragoza (UNAM).
- Staxäng, B. 1969. Acidification of Bark of Some Deciduous Trees. *Oikos* 20:2:16
- Stout, B. 1993. The Good, the bad and the Ugly of Monitoring Programs: Defining Questions and Establishing Objectives. *Environmental Monitoring and Assessment* 26:91-98
- Swiemboda, M. and A. Kalemba, 1979. The bark of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) as a Biological Indicator of a Atmospheric Air Pollution. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 48:4:529-548.
- Tamm, O. 1959. Studier over klimatets humiditete I Sverige. Kungl. Skogshogsk. Skr. 32. Stockholm.
- Tamm, O. C. 1950. *Northern coniferous forest soil*, Scrivener Pres. Oxford, England
- Tamm, O. C. and E. B. Cowling, 1977. *Acid Precipitation and Forest Vegetation*. *Water, Air and Soil Pollution* 7:503-511.
- Tyler M. G. 1994. *Ecología y Medio Ambiente*. Iberoamericana. México, D.F
- Ulrich, B., R. Mayer and P. K. Khana, 1979. Deposition von Luftverunreinigungen und ihre Auswirkungen in Waldökosystemen im Solling. *Schriften aus der Forst. Fak. der Univ. Göttinger u. d. Niedersächs. Forstl. Versuchsanst.* 58:291.
- United States Department of Agriculture (USDA), 1995. *Forest Health Monitoring*. Washington, USA.
- Waring, R. H., 1987. Characteristics of Trees Predisposed to Die. *Bioscience* 37:8:569-574.

- WNO 1968. Air Pollutants, meteorology and plant injury. Mukammal, E. I., C. Brandt, Neuwirth R., D. H. Pack y W. C. Swinbank (eds.). Secretariat of the World Meteorological Organization. Suiza. 74 pp.
- Westman, L. 1974. Air Pollution indications and Growth of Spruce and Pine Near a Sulfite Plant. *Ambio* 3:5:189-193

#### PAGINAS DE INTERNET

- Arboretum de Villardebelle, 2005. Sitio revisado el 4 de noviembre de 2007 (<http://www.pinetum.org>)
- CENAPRED. 1997. Reporte de la actividad del volcán Popocatepetl. Centro Nacional de Prevencion de Desastres (CENAPRED) <http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/> (consultado en el mes de agosto de 2003)
- CENAPRED. 2001. Reporte de la actividad del volcán Popocatepetl. Centro Nacional de Prevencion de Desastres (CENAPRED) <http://www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/> (consultado en el mes de agosto de 2003)
- Universidad de Georgia. 2006. Imagenes forestales pertenecientes al proyecto The Bugwood Network and USDA Forest Service. Departamento de Entomologia. Escuela Warnell de Recursos Forestales y Naturales, y el Colegio de Ciencias Agrícolas y Ambientales. (Consultado en línea en 4 de noviembre de 2007) [www.forestryimages.org](http://www.forestryimages.org)
- Vargas, M., F. 1997. Parques nacionales de México. Instituto Nacional de Ecología. SEMARNAP. México. (Revisado en línea en el mes de abril de 1998: <http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/parques/edomexico2b.html> y <http://www.planeta.com/ecotravel/mexico/parques/df2.html> )

## XII. ANEXOS

### 12.1 TECNICAS DE DETERMINACION DE IONES

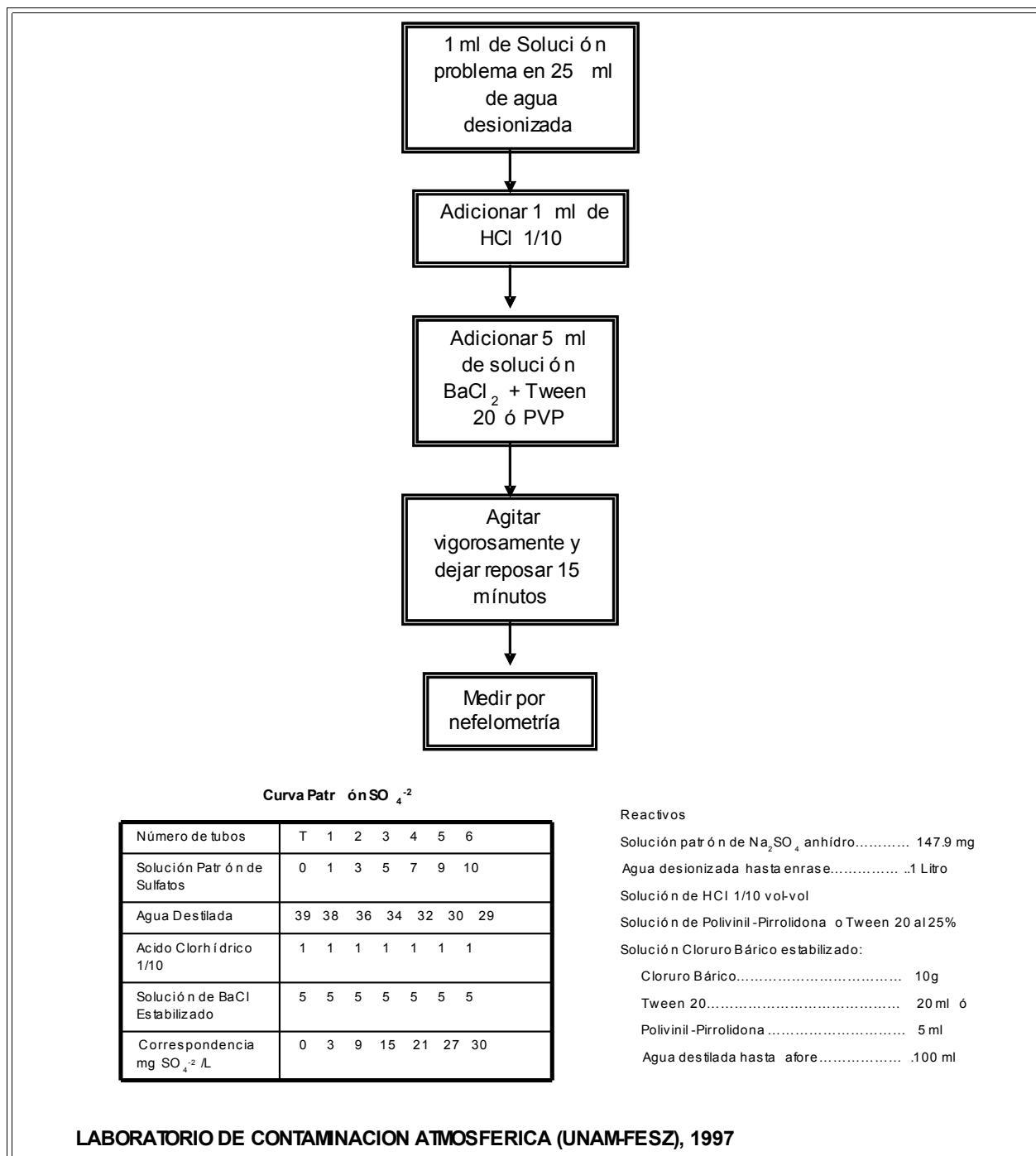
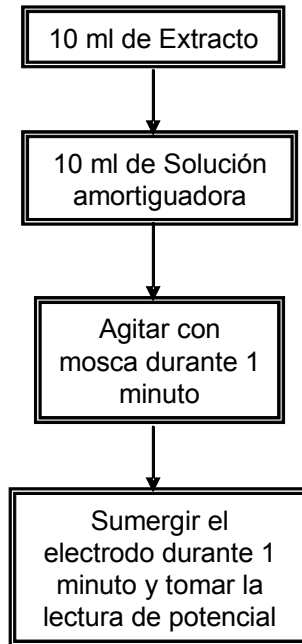


Figura 45. Determinación de sulfatos por método turbidimétrico.





**Curva Patrón de Nitratos**

Número de Frasco	T	1	2	3
Solución Stock de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	1	10	50
Agua Desionizada	100	99	90	50
Correspondencia mg/L de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	1	10	50

**Reactivos**

Solución stock de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

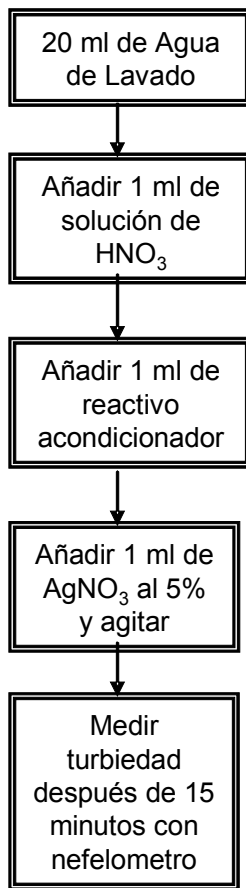
KNO<sub>3</sub>.....0.7217g  
 Agua Destilada hasta afore.....1L

Solución amortiguadora

Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>..... 6.66 g  
 Ag<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>..... 3.12 g  
 Acido Sulfámico..... 1.94  
 Agua Destilada hasta afore.....1 L

Laboratorio de Contaminación Atmosférica (UNAM-FESZ), 1997

**Figura 46. Determinación de nitratos por método de ión selectivo**



**Curva Patrón de Cloruros**

Número de tubo	T	1	2	3	4	5
Solución patrón de Cl <sup>-</sup>	0	4	8	12	16	20
Agua desionizada (ml)	30	23	19	15	11	7
Acido Nítrico (ml)	1	1	1	1	1	1
Reactivo acondicionador	1	1	1	1	1	1
AgNO <sub>3</sub>	1	1	1	1	1	1
Correspondencia de mg/L de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	4	8	12	16	20

**Reactivos**

HNO<sub>3</sub> al 13%

Acondicionador

Glicerina.....50 ml

Agua desionizada.....300 ml

Alcohol etílico.....100 ml

AgNO<sub>3</sub> al 5% P/V

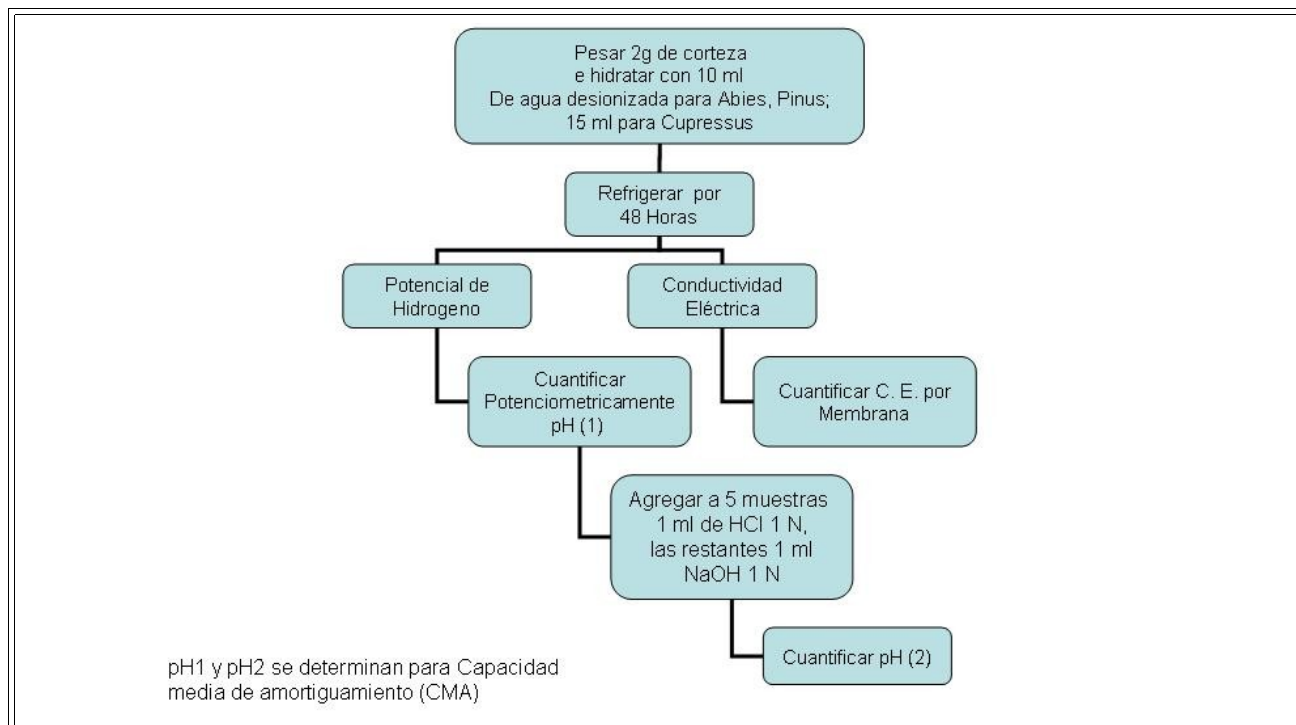
Solución estándar Cl<sup>-</sup>

NaCl.....0.1649 g

Agua deionizada hasta afore .....100 ml

**Laboratorio de Contaminación Atmosférica (UNAM-FEZ), 1997**

**Figura 47. Determinación de cloruros por el método turbidimétrico.**



**Figura 48. Determinación de pH y conductividad eléctrica en extractos de corteza  
(Staxang 1969; Grodzinska 1977)**

## 12.2 TABLAS DE MEDIAS Y CONTRASTES, MANOVA PRUEBA TUKEY

$\alpha=0.05$

### SULFATOS, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTEMP	238974.0	5	47794.7	4.12	0.0026
RESIDUAL	765356.0	66	11596.3		
TOTAL (CORRECTED)	1.00433E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*37.1859	0.000127209
ABEH - CEDH	*148.547	0.000127209
ABEH - CEDS	*149.561	0.000127209
ABEH - PINH	*101.692	0.000127209
ABEH - PINS	*135.734	0.000127209
ABES - CEDH	*111.362	0.000127209
ABES - CEDS	*112.375	0.000127209
ABES - PINH	*64.5061	0.000127209
ABES - PINS	*98.5479	0.000127209
CEDH - CEDS	*1.01325	0.000127209
CEDH - PINH	*-46.8555	0.000127209
CEDH - PINS	*-12.8136	0.000127209
CEDS - PINH	*-47.8688	0.000127209
CEDS - PINS	*-13.8269	0.000127209
PINH - PINS	*34.0419	0.000127209

\* denotes a statistically significant difference.

### SULFATOS, ESPECIE

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	223718.0	2	111859.0	9.89	0.0002
RESIDUAL	780612.0	69	11313.2		
TOTAL (CORRECTED)	1.00433E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	*130.461	0.0000637474
ABETO - PINO	*100.12	0.0000637474
CEDRO - PINO	*-30.3412	0.0000637474

\* denotes a statistically significant difference.

## SULFATOS, TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	10437.5	1	10437.5	0.74	0.3942
RESIDUAL	993892.0	70	14198.5		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	1.00433E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
-----			
HUMEDAS - SECAS	*24.0803		0.0000409236

\* denotes a statistically significant difference.

## SULFATOS, ESPACIAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	772.406	1	772.406	0.05	0.8171
RESIDUAL	1.00356E6	70	14336.5		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	1.00433E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
-----			
DDL - I-P	*6.55068		0.0000411221

\* denotes a statistically significant difference.

## SULFATOS, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	190464.0	3	63488.2	2.64	0.0776
RESIDUAL	481158.0	20	24057.9		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	671623.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
-----			
DLH - DLS	*-135.951		0.000215869
DLH - IPH	*-153.514		0.000215869
DLH - IPS	*56.8087		0.000215869
DLS - IPH	*-17.563		0.000215869
DLS - IPS	*192.759		0.000215869
IPH - IPS	*210.322		0.000215869

\* denotes a statistically significant difference.

## SULFATOS, CEDRO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	3416.31	3	1138.77	88.22	0.0000
RESIDUAL	258.164	20	12.9082		
TOTAL (CORRECTED)	3674.47	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*0.0750555	0.00000500029
DLH - IPH	*-24.76	0.00000500029
DLH - IPS	*-22.8085	0.00000500029
DLS - IPH	*-24.835	0.00000500029
DLS - IPS	*-22.8836	0.00000500029
IPH - IPS	*1.95144	0.00000500029

\* denotes a statistically significant difference.

## SULFATOS, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	13187.1	3	4395.71	0.95	0.4334
RESIDUAL	92128.1	20	4606.4		
TOTAL (CORRECTED)	105315.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*55.7246	0.0000944589
DLH - IPH	*45.5337	0.0000944589
DLH - IPS	*57.8928	0.0000944589
DLS - IPH	*-10.1909	0.0000944589
DLS - IPS	*2.16827	0.0000944589
IPH - IPS	*12.3591	0.0000944589

\* denotes a statistically significant difference.

## NITRATOS, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gNO3 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTMP	14649.0	5	2929.8	6.68	0.0000
RESIDUAL	28953.4	66	438.688		
TOTAL (CORRECTED)	43602.4	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*-10.7887	0.0000247421
ABEH - CEDH	*26.351	0.0000247421
ABEH - CEDS	*17.669	0.0000247421
ABEH - PINH	*-3.22625	0.0000247421
ABEH - PINS	*-11.9134	0.0000247421
ABES - CEDH	*37.1397	0.0000247421
ABES - CEDS	*28.4576	0.0000247421
ABES - PINH	*7.56244	0.0000247421
ABES - PINS	*-1.12471	0.0000247421
CEDH - CEDS	*-8.68204	0.0000247421
CEDH - PINH	*-29.5772	0.0000247421
CEDH - PINS	*-38.2644	0.0000247421
CEDS - PINH	*-20.8952	0.0000247421
CEDS - PINS	*-29.5824	0.0000247421
PINH - PINS	*-8.68715	0.0000247421

\* denotes a statistically significant difference.

### NITRATOS, ESPECIE

Analysis of Variance for ug\_gNO3 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	13045.6	2	6522.78	14.73	0.0000
RESIDUAL	30556.8	69	442.853		
TOTAL (CORRECTED)	43602.4	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	*27.4043	0.0000126124
ABETO - PINO	*-2.17548	0.0000126124
CEDRO - PINO	*-29.5798	0.0000126124

\* denotes a statistically significant difference.

### NITRATOS, TEMPORADA

Analysis of Variance for ug\_gNO3 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	1585.73	1	1585.73	2.64	0.1086
RESIDUAL	42016.7	70	600.238		
TOTAL (CORRECTED)	43602.4	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
HUMEDAS - SECAS	*-9.38596	0.00000841425

\* denotes a statistically significant difference.

## NITRATOS, ESPACIAL

Analysis of Variance for ug\_gNO3 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	2105.45	1	2105.45	3.55	0.0636
RESIDUAL	41496.9	70	592.813		
TOTAL (CORRECTED)	43602.4	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DDL - I-P	*-10.8152	0.00000836205

\* denotes a statistically significant difference.

## CLORUROS, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	232713.0	3	77571.1	2.84	0.0638
RESIDUAL	545916.0	20	27295.8		
TOTAL (CORRECTED)	778629.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*-20.0191	0.000229938
DLH - IPH	*-241.5	0.000229938
DLH - IPS	*-25.421	0.000229938
DLS - IPH	*-221.481	0.000229938
DLS - IPS	*-5.40197	0.000229938
IPH - IPS	*216.079	0.000229938

\* denotes a statistically significant difference.

## NITRATOS, CEDRO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gNO3 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	17731.6	3	5910.54	95.87	0.0000
RESIDUAL	1233.03	20	61.6513		
TOTAL (CORRECTED)	18964.6	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.



Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*-9.10123	0.0000109278
DLH - IPH	*-54.0822	0.0000109278
DLH - IPS	*-62.345	0.0000109278
DLS - IPH	*-44.9809	0.0000109278
DLS - IPS	*-53.2438	0.0000109278
IPH - IPS	*-8.26285	0.0000109278

\* denotes a statistically significant difference.

### SULFATOS, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gSO4 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	13187.1	3	4395.71	0.95	0.4334
RESIDUAL	92128.1	20	4606.4		
TOTAL (CORRECTED)	105315.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*55.7246	0.0000944589
DLH - IPH	*45.5337	0.0000944589
DLH - IPS	*57.8928	0.0000944589
DLS - IPH	*-10.1909	0.0000944589
DLS - IPS	*2.16827	0.0000944589
IPH - IPS	*12.3591	0.0000944589

\* denotes a statistically significant difference.

### CLORUROS, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTMP	470145.0	5	94029.0	2.16	0.0691
RESIDUAL	2.87346E6	66	43537.3		
TOTAL (CORRECTED)	3.34361E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*98.0299	0.000246485
ABEH - CEDH	*132.984	0.000246485
ABEH - CEDS	*192.375	0.000246485
ABEH - PINH	*-51.001	0.000246485
ABEH - PINS	*77.8519	0.000246485
ABES - CEDH	*34.9539	0.000246485
ABES - CEDS	*94.345	0.000246485
ABES - PINH	*-149.031	0.000246485
ABES - PINS	*-20.1779	0.000246485
CEDH - CEDS	*59.3911	0.000246485
CEDH - PINH	*-183.985	0.000246485
CEDH - PINS	*-55.1319	0.000246485
CEDS - PINH	*-243.376	0.000246485
CEDS - PINS	*-114.523	0.000246485
PINH - PINS	*128.853	0.000246485

\* denotes a statistically significant difference.

### CLORUROS, ESPECIE

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	291703.0	2	145852.0	3.30	0.0429
RESIDUAL	3.05191E6	69	44230.5		
TOTAL (CORRECTED)	3.34361E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	*113.664	0.000126046
ABETO - PINO	*-35.5895	0.000126046
CEDRO - PINO	*-149.254	0.000126046

\* denotes a statistically significant difference.

### NITRATOS, TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	163905.0	1	163905.0	3.61	0.0616
RESIDUAL	3.1797E6	70	45424.3		
TOTAL (CORRECTED)	3.34361E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
HUMEDAS - SECAS	*95.4246	0.0000731978

\* denotes a statistically significant difference.

## CLORUROS, ZONA

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	15372.8	1	15372.8	0.32	0.5714
RESIDUAL	3.32824E6	70	47546.2		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	3.34361E6	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DDLL - I-P	*-29.224		0.0000748879

\* denotes a statistically significant difference.

## CLORUROS, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	232713.0	3	77571.1	2.84	0.0638
RESIDUAL	545916.0	20	27295.8		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	778629.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DLH - DLS	*-20.0191		0.000229938
DLH - IPH	*-241.5		0.000229938
DLH - IPS	*-25.421		0.000229938
DLS - IPH	*-221.481		0.000229938
DLS - IPS	*-5.40197		0.000229938
IPH - IPS	*216.079		0.000229938

\* denotes a statistically significant difference.

## CLORUROS, CEDRO ESPECIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	285588.0	3	95195.9	16.79	0.0000
RESIDUAL	113385.0	20	5669.26		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	398973.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*11.0606	0.000104791
DLH - IPH	*-252.622	0.000104791
DLH - IPS	*-144.9	0.000104791
DLS - IPH	*-263.682	0.000104791
DLS - IPS	*-155.96	0.000104791
IPH - IPS	*107.722	0.000104791

\* denotes a statistically significant difference.

### CLORUROS, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ug\_gCl - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	591774.0	3	197258.0	3.08	0.0511
RESIDUAL	1.28253E6	20	64126.5		
TOTAL (CORRECTED)	1.8743E6	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*285.033	0.000352437
DLH - IPH	*396.25	0.000352437
DLH - IPS	*368.923	0.000352437
DLS - IPH	*111.217	0.000352437
DLS - IPS	*83.8894	0.000352437
IPH - IPS	*-27.3276	0.000352437

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTMP	1.99217E7	5	3.98433E6	5.07	0.0005
RESIDUAL	5.18963E7	66	786307.0		
TOTAL (CORRECTED)	7.18179E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*-234.236	0.0010475
ABEH - CEDH	0.0	0.0010475
ABEH - CEDS	*-234.236	0.0010475
ABEH - PINH	*1130.39	0.0010475
ABEH - PINS	*789.882	0.0010475
ABES - CEDH	*234.236	0.0010475
ABES - CEDS	0.0	0.0010475
ABES - PINH	*1364.62	0.0010475
ABES - PINS	*1024.12	0.0010475
CEDH - CEDS	*-234.236	0.0010475
CEDH - PINH	*1130.39	0.0010475
CEDH - PINS	*789.882	0.0010475
CEDS - PINH	*1364.62	0.0010475
CEDS - PINS	*1024.12	0.0010475
PINH - PINS	*-340.507	0.0010475

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, ESPECIE

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	1.85676E7	2	9.2838E6	12.03	0.0000
RESIDUAL	5.32504E7	69	771744.0		
TOTAL (CORRECTED)	7.18179E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	0.0	0.000526509
ABETO - PINO	*1077.25	0.000526509
CEDRO - PINO	*1077.25	0.000526509

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, TEMPORAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	1.30889E6	1	1.30889E6	1.30	0.2582
RESIDUAL	7.05091E7	70	1.00727E6		
TOTAL (CORRECTED)	7.18179E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
HUMEDAS - SECAS	*-269.659	0.000344689

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, ZONA

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	5.30588E6	1	5.30588E6	5.58	0.0209
RESIDUAL	6.65121E7	70	950172.0		
TOTAL (CORRECTED)	7.18179E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DDLL - I-P	*-542.928		0.000334776

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, ESPACIAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	5.30588E6	1	5.30588E6	5.58	0.0209
RESIDUAL	6.65121E7	70	950172.0		
TOTAL (CORRECTED)	7.18179E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DDLL - I-P	*-542.928		0.000334776

\* denotes a statistically significant difference.

### CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	5.69276E6	3	1.89759E6	1.85	0.1700
RESIDUAL	2.04695E7	20	1.02348E6		
TOTAL (CORRECTED)	2.61623E7	23			

Contrast	Difference	+/-	Limits
DLH - DLS	*-783.889		0.001408
DLH - IPH	*-1318.94		0.001408
DLH - IPS	*-1003.53		0.001408
DLS - IPH	*-535.056		0.001408
DLS - IPS	*-219.639		0.001408
IPH - IPS	*315.417		0.001408

\* denotes a statistically significant difference.

## CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, CEDRO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	5.69276E6	3	1.89759E6	1.85	0.1700
RESIDUAL	2.04695E7	20	1.02348E6		
TOTAL (CORRECTED)	2.61623E7	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DLH - DLS	*-783.889		0.001408
DLH - IPH	*-1318.94		0.001408
DLH - IPS	*-1003.53		0.001408
DLS - IPH	*-535.056		0.001408
DLS - IPS	*-219.639		0.001408
IPH - IPS	*315.417		0.001408

\* denotes a statistically significant difference.

## CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for uS\_cm2 - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	744683.0	3	248228.0	27.42	0.0000
RESIDUAL	181068.0	20	9053.4		
TOTAL (CORRECTED)	925751.0	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DLH - DLS	*-334.806		0.000132424
DLH - IPH	*-84.5		0.000132424
DLH - IPS	*-430.708		0.000132424
DLS - IPH	*250.306		0.000132424
DLS - IPS	*-95.9028		0.000132424
IPH - IPS	*-346.208		0.000132424

\* denotes a statistically significant difference.

## IONES HIDRONIO, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTMP	7.05838E6	5	1.41168E6	7.24	0.0000
RESIDUAL	1.28775E7	66	195113.0		
TOTAL (CORRECTED)	1.99358E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*209.406	0.000521798
ABEH - CEDH	0.0	0.000521798
ABEH - CEDS	*209.375	0.000521798
ABEH - PINH	*-714.311	0.000521798
ABEH - PINS	*37.2434	0.000521798
ABES - CEDH	*-209.406	0.000521798
ABES - CEDS	*-0.0310375	0.000521798
ABES - PINH	*-923.718	0.000521798
ABES - PINS	*-172.163	0.000521798
CEDH - CEDS	*209.375	0.000521798
CEDH - PINH	*-714.311	0.000521798
CEDH - PINS	*37.2434	0.000521798
CEDS - PINH	*-923.687	0.000521798
CEDS - PINS	*-172.132	0.000521798
PINH - PINS	*751.555	0.000521798

\* denotes a statistically significant difference.

### IONES HIDRONIO, ESPECIE

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	3.14324E6	2	1.57162E6	6.46	0.0027
RESIDUAL	1.67926E7	69	243371.0		
TOTAL (CORRECTED)	1.99358E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	*-0.0155187	0.000295667
ABETO - PINO	*-443.237	0.000295667
CEDRO - PINO	*-443.222	0.000295667

\* denotes a statistically significant difference.

### IONES HIDRONIO, TEMPORAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	2.73937E6	1	2.73937E6	11.15	0.0013
RESIDUAL	1.71965E7	70	245664.0		
TOTAL (CORRECTED)	1.99358E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
HUMEDAS - SECAS	*390.112	0.000170225

\* denotes a statistically significant difference.



### IONES HIDRONIO, ESPACIAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	1.06952E6	1	1.06952E6	3.97	0.0503
RESIDUAL	1.88663E7	70	269519.0		
TOTAL (CORRECTED)	1.99358E7	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DDL - I-P	*-243.758		0.000178299

\* denotes a statistically significant difference.

### IONES HIDRONIO, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	305706.0	3	101902.0	1.72	0.1950
RESIDUAL	1.1845E6	20	59225.2		
TOTAL (CORRECTED)	1.49021E6	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
DLH - DLS	*128.711		0.0003387
DLH - IPH	*-104.951		0.0003387
DLH - IPS	*185.151		0.0003387
DLS - IPH	*-233.662		0.0003387
DLS - IPS	*56.4398		0.0003387
IPH - IPS	*290.102		0.0003387

\* denotes a statistically significant difference.

### IONES HIDRONIO, CEDRO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	305607.0	3	101869.0	1.72	0.1951
RESIDUAL	1.18451E6	20	59225.6		
TOTAL (CORRECTED)	1.49012E6	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*128.711	0.000338701
DLH - IPH	*-104.951	0.000338701
DLH - IPS	*185.089	0.000338701
DLS - IPH	*-233.662	0.000338701
DLS - IPS	*56.3777	0.000338701
IPH - IPS	*290.04	0.000338701

\* denotes a statistically significant difference.

### IONES HIDRONIO, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for ueq[H\_] - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	8.22723E6	3	2.74241E6	9.82	0.0003
RESIDUAL	5.58504E6	20	279252.0		
TOTAL (CORRECTED)	1.38123E7	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*168.246	0.000735462
DLH - IPH	*-1266.04	0.000735462
DLH - IPS	*68.824	0.000735462
DLS - IPH	*-1434.29	0.000735462
DLS - IPS	*-99.422	0.000735462
IPH - IPS	*1334.86	0.000735462

\* denotes a statistically significant difference.

### ACIDEZ, ESPECIE-TEMPORAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:SPTMP	8.15713	5	1.63143	21.72	0.0000
RESIDUAL	4.95846	66	0.0751281		
TOTAL (CORRECTED)	13.1156	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABEH - ABES	*-0.510479	3.23788E-7
ABEH - CEDH	*-0.0300039	3.23788E-7
ABEH - CEDS	*-0.513211	3.23788E-7
ABEH - PINH	*0.460139	3.23788E-7
ABEH - PINS	*0.00913308	3.23788E-7
ABES - CEDH	*0.480475	3.23788E-7
ABES - CEDS	*-0.00273224	3.23788E-7
ABES - PINH	*0.970618	3.23788E-7
ABES - PINS	*0.519612	3.23788E-7
CEDH - CEDS	*-0.483207	3.23788E-7
CEDH - PINH	*0.490143	3.23788E-7
CEDH - PINS	*0.039137	3.23788E-7
CEDS - PINH	*0.97335	3.23788E-7
CEDS - PINS	*0.522344	3.23788E-7
PINH - PINS	*-0.451006	3.23788E-7

\* denotes a statistically significant difference.

### ACIDEZ, ESPECIE

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ESPE	3.97223	2	1.98611	14.99	0.0000
RESIDUAL	9.14336	69	0.132512		
TOTAL (CORRECTED)	13.1156	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
ABETO - CEDRO	*-0.0163681	2.18171E-7
ABETO - PINO	*0.489875	2.18171E-7
CEDRO - PINO	*0.506243	2.18171E-7

\* denotes a statistically significant difference.

### ACIDEZ, TEMPORAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:TEMP	4.17427	1	4.17427	32.68	0.0000
RESIDUAL	8.94132	70	0.127733		
TOTAL (CORRECTED)	13.1156	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
HUMEDAS - SECAS	*-0.481564	1.22745E-7

\* denotes a statistically significant difference.

## ACIDEZ, ESPACIAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:ZONA	0.00217663	1	0.00217663	0.01	0.9145
RESIDUAL	13.1134	70	0.187334		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	13.1156	71			
-----					

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
-----			
DDL - I-P	*0.0109965		1.48649E-7
-----			

\* denotes a statistically significant difference.

## ACIDEZ, ABETO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	1.80731	3	0.602437	9.09	0.0005
RESIDUAL	1.32493	20	0.0662464		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	3.13224	23			
-----					

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/-	Limits
-----			
DLH - DLS	*-0.369129		3.58215E-7
DLH - IPH	*-0.00235183		3.58215E-7
DLH - IPS	*-0.65418		3.58215E-7
DLS - IPH	*0.366777		3.58215E-7
DLS - IPS	*-0.285051		3.58215E-7
IPH - IPS	*-0.651828		3.58215E-7
-----			

\* denotes a statistically significant difference.

## ACIDEZ, CEDRO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
-----					
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	1.64578	3	0.548592	8.75	0.0007
RESIDUAL	1.25364	20	0.0626821		
-----					
TOTAL (CORRECTED)	2.89942	23			
-----					

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*-0.37499	3.48445E-7
DLH - IPH	*-0.0623587	3.48445E-7
DLH - IPS	*-0.653783	3.48445E-7
DLS - IPH	*0.312631	3.48445E-7
DLS - IPS	*-0.278793	3.48445E-7
IPH - IPS	*-0.591424	3.48445E-7

\* denotes a statistically significant difference.

### ACIDEZ, PINO ESPACIAL-TEMPORAL

Analysis of Variance for pH - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:PERIZO	2.13979	3	0.713264	14.68	0.0000
RESIDUAL	0.971912	20	0.0485956		
TOTAL (CORRECTED)	3.1117	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Contrast	Difference	+/- Limits
DLH - DLS	*-0.270365	3.06804E-7
DLH - IPH	*0.527908	3.06804E-7
DLH - IPS	*-0.103739	3.06804E-7
DLS - IPH	*0.798273	3.06804E-7
DLS - IPS	*0.166626	3.06804E-7
IPH - IPS	*-0.631647	3.06804E-7

\* denotes a statistically significant difference.