



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

“Dendrocronología y PIXE para la Evaluación del
Crecimiento de pino Influenciado por el Cambio
del Régimen Climático y la Contaminación
Atmosférica en el Iztapopo.”

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:
ALM A ROSA CRUZ MUÑOZ



DIRECTOR DE TESIS: M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ

México, D.F.

Junio, 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

❖ A mis Padres

Por todo su cariño, paciencia, confianza, apoyo y esfuerzo que me han procurado para la culminación de este proyecto, siendo la mejor de las herencias. Los quiero mucho.

❖ A mi Hermano

Porque te he querido desde el primer día que llegaste a casa; por tus locos ideales, por escucharme cuando lo necesito y por ser tan espontáneo y hacerme reír tanto.

❖ A Marcos Daniel Pérez

Mi motivo, complemento y precursor. Gran parte de esto, te lo debo a ti. Gracias por *Vivir la Vida Conmigo* y hacerme tan feliz. Nunca olvido... "Amareto y Capuchino".

❖ A mis Abuelos

Sotero, Melitón y Celia, por todo su cariño, bondad y sabiduría que nos han sabido dar, los admiro mucho.

❖ A mis Tíos y Primos

Por animarme y tener la confianza de que concluyera mi carrera profesional. En especial a Salvador Domínguez, por las aventuras de nuestra niñez y porque siempre me consentiste y procuraste en lo posible, te quiero mucho.

❖ A Mitzi Aline

Mi niña hermosa, gracias por tu cariño.

❖ A mis Amigas y Amigos

Rebeca Hernández, por todo tu afecto, tu atención y lealtad, por los proyectos profesionales y personales compartidos, pero sobre todo porque aprendí a quererte por tu sencillez y bondad. Gracias.

Paty, Anabel y Verónica por depositar en mí su confianza para compartir secretos y brindar acertados consejos, he disfrutado mucho de su compañía incondicional.

Juan Luis, Raquel, Héctor, Armando, Maribel, Rosa, Amadeo, Manuel y Rodrigo, por todos los buenos momentos compartidos, los recuerdo con cariño.

Raúl Valeriano, por estar siempre atento en el desarrollo de este proyecto, por tu disposición de ayudarme y todo tu esmero. Gracias amigo.

Benito Morán por toda la buena vibra que contagias con tu hiperactividad, y por tu ayuda incondicional en la asistencia técnica del Laboratorio, pero sobretodo por tu sencillez, tu fino sentido del humor y buena amistad.

A Rebeca, Leonel, Martín, Edgar, Estrellita, Gisela, Marisela y Anilú por el tiempo de convivencia y su valioso apoyo para terminar este proyecto. Gracias a todos.

❖ **A mi Director de Tesis**

M. en C. Germán Calva Vásquez, por su profesionalismo, por toda su paciencia y el tiempo dedicado a mi formación y al mejoramiento de esta tesis; le agradezco la oportunidad de incorporarme a su equipo de trabajo y aún más, las lecciones personales que me ayudaron a conocerme, valorarme e integrarme.

❖ **Profesora María de los Ángeles Galván**

Gracias por su afecto, su comprensión y por la confianza e interés mostrado para el término de esta investigación. Le agradezco su tiempo en la minuciosa revisión del presente y sus valiosos aportes.

❖ **A tí Lector**

Gracias por dedicar tu tiempo en la consulta de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A la Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Instituciones a las cuales debo mi formación profesional.
- ❖ Al Instituto de Física de la UNAM, que me brindó el tiempo y el espacio para hacer uso del Acelerador de Partículas.
- ❖ Al Doctor Luis Rodríguez Fernández por el apoyo, paciencia y tiempo dedicado en la instrucción de la lectura, manejo y análisis de datos.
- ❖ Al Doctor José Luis Ruvalcaba Sil por la asistencia y sugerencias para el mejoramiento de esta investigación.
- ❖ A los técnicos del Peletrón, Karim López y Francisco J. Jaimes, por la ayuda brindada en el uso del Acelerador de Partículas.
- ❖ A mis Sinodales
 - Dra. Ma. Patricia Velasco de León
 - M. en C. Germán Calva Vásquez
 - M. en C. Efraín Ángeles Cervantes
 - Biól. Ma. de los Ángeles Galván Villanueva
 - Biól. Aída Zapata CruzPor la disposición en la revisión de esta tesis y aportar elementos importantes para la mejora de la misma.
- ❖ Al proyecto DGAPA IN216903-3 por la beca otorgada para el desarrollo de esta investigación.

*Aprende del árbol y deja que los vientos
de la vida te despojen de las ramas secas
para dejar lugar a los retoños nuevos*

*Aprende del árbol y deja caer las hojas
secas del pasado para que abonen el suelo,
donde tus raíces preparan el futuro*

*Aprende del árbol y no hagas del invierno
un tiempo de tristeza y de muerte, sino un
tiempo de esperanza, para arraigarte
mejor y revivir más fuerte en primavera.*

-René J. Trossero-

CONTENIDO GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. OBJETIVOS	
4.1 Objetivo General	5
4.2 Objetivo Particular	5
V. HIPOTESIS	6
VI. ANTECEDENTES	7
VII. MARCO TEÓRICO	
7.1 Características generales de la Ciudad de México	9
7.1.1 Clima de la ZMVM	10
7.1.2 Régimen Climático de la ZMVM	11
7.2 Relación entre la Contaminación Atmosférica y el Régimen climático	12
7.3 Importancia de las Estaciones de Monitoreo	13
7.4 Circulación de los vientos en la ZMVM	14
7.5 Efecto de la Contaminación Atmosférica en Bosques	15
7.6 Anatomía de la Madera	17
7.6.1 Cambium, duramen y xilema	17
7.7 Anillo de Crecimiento	21
7.7.1 Crecimiento de Primavera	22
7.7.2 Crecimiento de Verano	22
7.8 Dendrocronología	23
7.8.1 Fundamentos de la Dendrocronología	24
7.8.2 Aplicaciones de la Dendrocronología	26
7.9 Relación entre el Crecimiento Radial y el Clima	27
7.10 Evidencia del estrés en los árboles	28
7.11 Técnica de PIXE	29
7.12 Descripción de la Especie <i>Pinus hartwegii</i> Lindl.	30

VIII. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	
8.1 Parque Nacional Iztapopocatépetl	32
IX. MATERIAL Y MÉTODOS	
9.1 Fase de Gabinete	35
9.2 Fase de Campo	35
9.3 Fase de Laboratorio	38
X. ANÁLISIS DE RESULTADOS	
10.1 Anillos Anuales de Crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i> en el Paso de Cortés	42
10.1.1 Influencia de la Actividad Volcánica en el Crecimiento del Anillo	44
10.2 Cronología del Crecimiento Residual Anual de <i>Pinus hartwegii</i>	45
10.3 Variables Climáticas (precipitación y temperatura) de la zona de Paso de Cortés	48
10.3.1 Diferenciación de los Periodos de pp y T°	50
10.3.2 Influencia de la pp y T° en el Crecimiento Anual Estacional de <i>P. hartwegii</i>	51
10.3.3 Oscilaciones de pp y T° promedio Mensual del Paso de Cortés durante Tres Periodos	53
10.4 Crecimiento de Primavera y Verano de <i>Pinus hartwegii</i> en el periodo 1956-2004	56
10.5 Análisis Elemental de los Anillos con PIXE	
10.5.1 Macroelementos y Microelementos presentes en los Anillos de Crecimiento del <i>Pinus hartwegii</i>	59
10.5.2 Elementos Traza presentes en los Anillos de <i>Pinus hartwegii</i>	63
10.5.3 Otros Elementos detectados con PIXE en ambas muestras	
10.5.3.1 No pretratadas	66
10.5.3.2 Pretratadas	67
10.6 Comparación de la Incertidumbre en la Concentración de los Elementos detectados por PIXE en muestras Pretratadas y No Pretratadas	70
10.7 Concentración Anual de Contaminantes en el Noreste y Sureste del Valle de México durante el periodo 1986-2004	71
10.7.1 Concentración Mensual de Contaminantes en el Noreste y Sureste del Valle de México durante el periodo 1986-2004	73
10.8 Relación entre las Variables Climáticas y los Contaminantes	75
10.9 Relación entre la Eisión Anual de Contaminantes y el crecimiento de <i>Pinus hartwegii</i>	76

10.9.1 Similitud entre los Crecimientos Anuales de <i>P. hartwegii</i> con respecto a las Emisiones de Contaminantes	77
XI. CONCLUSIONES	80
XII. RECOMENDACIONES	81
XIII. BIBLIOGRAFÍA	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Sierras que rodean la Cuenca de México	9
Figura 2	Tipos de clima en la ZMVM	10
Figura 3	Isla de Calor como efecto urbano, turbulencia térmica y turbulencia mecánica de la ciudad	11
Figura 4	Distribución de las estaciones de monitoreo atmosférico	13
Figura 5	Líneas de flujo de aire superficial de 13-18 hrs en Junio de 1997 ...	14
Figura 6	Efecto de la disminución del pH como resultado de la lluvia ácida	16
Figura 7	Vista transversal de un tronco de coníferas y partes que lo integran	18
Figura 8	Anillo de crecimiento completo de <i>Pinus hartwegii</i>	21
Figura 9	Comparación entre cronologías de anillos de diferentes árboles	24
Figura 10	Diferencia de patrones de crecimiento radial	27
Figura 11	Registro de importantes sucesos climáticos en los anillos anuales de crecimiento	27
Figura 12	Fundamento de la Técnica de PIXE	30
Figura 13	Ejemplar de <i>Pinus hartwegii</i> en el Paso de Cortés	31
Figura 14	Zona de Muestreo (Paso de Cortés, en el Parque Nacional Iztapopocatépetl)	33
Figura 15	La zona de muestreo en el Paso de Cortés, orientación sureste	36
Figura 16	Extracción del Núcleo	37
Figura 17	Tratamiento de la Muestra	40
Figura 18	Procesamiento de la Muestra en el Laboratorio de Peletrón	42
Figura 19	Muestras pretratadas después de 10 días de calentamiento en la estufa	43
Figura 20	Espectro de la simulación de energía reflejado de la incidencia del haz en un núcleo de <i>P. hartwegii</i>	43

Figura 21	Registro del grosor de los primeros 45 anillos de <i>Pinus hartwegii</i> del Paso de Cortés con barras de incertidumbre del 0.05%	42
Figura 22	Núcleo de <i>P. hartwegii</i> y sección de los primeros 49 anillos, mostrando quinquenios de anillos muy estrechos	43
Figura 23	Cronología del Índice de Crecimiento Residual Anual de <i>Pinus hartwegii</i> en el periodo 1957-2004	46
Figura 24	Par de núcleos A y B, mostrando anillos muy estrechos por posible estrés hídrico	48
Figura 25	Oscilaciones Anuales de la pp total y la T° media correspondientes a la estación Meteorológica de San Luis Ameca en el periodo 1961-2005	49
Figura 26	Comparación de medias entre 3 periodos de tiempo para la pp y T° del Paso de Cortés	50
Figura 27	Dendrograma entre el crecimiento radial y las variables climáticas en el periodo 1961-2005	51
Figura 28	Dendrograma entre el crecimiento estacional y las variables climáticas de los 3 periodos	52
Figura 29	Presentación de las variables pp y T° media mensual, durante tres periodos, en el Paso de Cortés	54
Figura 30	Representación del Crecimiento de Primavera y Verano de <i>Pinus hartwegii</i> del Paso de Cortés en el periodo 1956-2004	56
Figura 31	Concentración de Macroelementos y Microelementos en ppm detectados con PIXE en muestras pretratadas y no pretratadas de <i>Pinus hartwegii</i>	60
Figura 32	Concentración de Elementos Traza en ppm detectados con PIXE en muestras pretratadas y no pretratadas	64
Figura 33	Otros elementos detectados con PIXE que no fueron encontrados simultáneamente en ambas muestras	67
Figura 34	Comparación de la incertidumbre en la concentración de los elementos detectados por PIXE, entre los núcleos pretratados y no pretratados	70

Figura 35	Registro Anual de la Concentración de SO ₂ , CO, NO ₂ y PST en el Noroeste y Suroeste del Valle de México durante el periodo 1989-2004	72
Figura 36	Concentración mensual de SO ₂ , CO y NO ₂ en el Noreste y Sureste del Valle de México	74
Figura 37	Dendrograma entre los Contaminantes y las Variables Climáticas por el método de Ward	75
Figura 38	Dendrograma entre el Crecimiento Radial en Correspondencia con la emisión de SO ₂ , CO, NO ₂ y PST del Periodo 1989-2004	77

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO I	Antecedentes de los estudios dendrocronológicos	7
CUADRO II	Tabla comparativa de pp y T°	47
CUADRO III	Correlación de Pearson entre los contaminantes emitidos anualmente y el grosor anual del periodo 1988-2004	76

RESUMEN

Para el caso de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), en los últimos 45 años, las fluctuaciones de temperatura se han incrementado, mientras que la precipitación anual es muy heterogénea, dando lugar a fenómenos como el efecto invernadero e inversiones térmicas constantes, lo que trae como consecuencia, la concentración de contaminantes atmosféricos. Lo anterior conduce a un cambio en las características físicas y químicas de la troposfera, que podría estar afectando directamente a los bosques. Por lo tanto es necesario conocer la respuesta de los pinos en las áreas boscosas del Parque Nacional Iztapopo bajo las condiciones de estrés.

El presente trabajo se realizó con un análisis retrospectivo del crecimiento radial de ejemplares de *Pinus hartwegii*, ubicados en el Parque Nacional Iztapopo, del periodo 1956-2004; se pudo observar que en los últimos 49 años el decremento en el grosor del anillo anual desciende drásticamente a partir de 1973 a 1978, evento que estaría relacionado con el uso de Pb en gasolinas. Asimismo se observó un descenso de 1994-1997, el cual coincide con los eventos de actividad volcánica del Popocatepetl.

Con la selección y elaboración de datos meteorológicos se obtuvo el comportamiento de las fluctuaciones de las variables precipitación (pp) y temperatura (T°) del periodo (1961-2005) de la estación más cercana al Paso de Cortés. Se determinaron 3 periodos de comportamiento estocástico, de tal forma que se establece una ciclicidad y al mismo tiempo, el periodo inusual de elevada temperatura y disminución de la precipitación, esta última principalmente coincide con el decremento del grosor del anillo.

Se realizó una base de datos de concentración de los contaminantes SO₂, CO, NO₂ y PST obtenida de la RAMA, determinándose que el SO₂ se encontró más asociado con el

crecimiento anual de *Pinus hartwegii* en el periodo 1986-2004 ($r=0.541$). Y por otra parte, la emisión de NO_2 estuvo relacionada en primer lugar con los niveles de temperatura y secundariamente con la precipitación.

I. INTRODUCCIÓN

Los bosques templados de altura, nos proveen de agua que captan de la atmósfera al atraer la lluvia o capturando la humedad del ambiente que generalmente proviene del mar. Al contar con un buen sistema de filtrado a través del suelo, el agua llega hasta los mantos acuíferos, que a su vez son la cuna de ríos y lagos que proveen de agua a la Cuenca de México. En este sentido, los bosques templados de altura de la ZMVM se han visto afectados por las características específicas que precisan para un óptimo desarrollo.

La importancia de los bosques en la ZMVM radica en que mejoran la calidad del aire altamente contaminado; abatiéndola y atrapando parte de los contaminantes gaseosos y particulados; aumentando la oxigenación en las horas críticas del día, cuando el nivel de contaminación atmosférica es alto. También regulan la temperatura y humedad relativa, así como la conservación del suelo y el albergue de un gran número de especies animales y vegetales.

Los fenómenos inducidos por el ser humano, que ya han sido descritos, han influido en el deterioro natural de estas funciones. De tal forma que a principios de los años 80's, el oyamel del Parque Nacional Desierto de los Leones, mostró síntomas de decline como los observados en las Montañas Rocallosas (USA), fenómeno que se incrementó algunos años después, hasta acabar con grandes áreas boscosas; y al que se le atribuyó que la causa principal eran las grandes descargas de polución a la atmósfera provenientes de la Ciudad de México (Alvarado y Hernández, 2002).

La emisión de contaminantes a la atmósfera tanto de fuentes fijas como móviles propicia irregularidades en el régimen de lluvias y temperaturas a nivel regional, dando origen a constantes inversiones térmicas. El incremento de gases en la atmósfera promueve la formación del "Efecto invernadero" como resultado de las irregularidades ya planteadas. Además de la explosión demográfica que se ha registrado desde hace

varias décadas que demanda áreas para casa habitación invadiendo terrenos forestales, propiciando el cambio en el uso del suelo para pequeños productores agrícolas. Como consecuencia de la contaminación atmosférica, existe una alteración en las condiciones del régimen climático en la ZMVM, ejemplo de ello es el cambio en la cantidad y duración de la precipitación, así como el aumento en la temperatura y la forma en que repercuten en la ganancia de crecimiento de los árboles de pino y oyamel.

La investigación dendrocronológica, tiene como fundamento relacionar el crecimiento anual radial de diferentes especies arbóreas para conocer la edad aproximada del árbol, así como los años de registro de fenómenos como sequías e incendios forestales y el diseño de cronologías para analizar la variabilidad del crecimiento de *P. hartwegii*.

La inquietud para realizar este trabajo surgió de la necesidad de poseer información más amplia, sobre el comportamiento del crecimiento de los bosques del *P. hartwegii* a través de un periodo largo de tiempo, en relación al clima y la concentración elemental, información que hasta el momento es muy escasa, aún cuando la efectividad de la dendrocronología y de la técnica de PIXE está probada.

La importancia de utilizar una técnica de análisis elemental radica en conocer cuáles elementos se encuentran involucrados en la muestra de madera y en qué concentración. PIXE (Particle Induced X-Ray Emission), se basa en desplazar el electrón más externo del elemento presente en la madera, usando un acelerador de partículas, que permite conocer la concentración de Mn, Fe, Cu, Zn, Ni, Al, Pb, Br, Ti, V, Sr, S, P, Cl, Ca y K.

El presente trabajo se enfocó principalmente en la importancia que tienen los bosques de *P. hartwegii* ubicado en el Paso de Cortés, para brindar información de tipo ambiental, mediante el análisis de sus anillos de crecimiento, de tal forma que permita al mismo tiempo conocer la vulnerabilidad de la especie para establecer programas de conservación y recuperación de la misma.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los impactos directos del cambio climático sobre la diversidad vegetal en México, se producen a través de los efectos: el calentamiento que alarga el periodo de actividad de las plantas e incrementa su productividad, y la reducción de las disponibilidades hídricas que actúa en forma contraria, situación que no ha sido estudiada.

El fenómeno del calentamiento Global (Nacional Geographic, 2004), ha repercutido, a nivel mundial, de tal forma que a partir de los años 70's a la fecha se ha registrado un aumento en la temperatura de entre 0.08 a 0.22 °C por decenio; atribuidos al incremento de emisión de gases de efecto invernadero, aerosoles y partículas, resultado de las actividades antropogénicas.

Para el caso de la ZMVM, las fluctuaciones de temperatura se han incrementado en los últimos 45 años, mientras que la precipitación anual es muy heterógena, dando lugar a fenómenos como el efecto invernadero e inversiones térmicas constantes. Lo anterior conduce a un cambio en las características físicas y químicas de la troposfera, que podría estar afectando directamente a los bosques. Por lo tanto es necesario conocer la respuesta de los pinos en las áreas boscosas del Parque Nacional Iztapopo bajo las condiciones de estrés.

III. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con Cervantes (1999) y Galindo (1998) los glaciares de la Sierra Nevada han cambiado con el tiempo, y con ello las condiciones microclimáticas. Por ello la zona de estudio elegida fue el Paso de Cortés, en el Parque Nacional Iztapopo, donde la especie que predomina es el pino.

Conforme a la base de datos del Laboratory of Tree Ring Research (fundado en 1937, por A. E. Douglass en Tucson, Arizona), las especies de pino: *P. hartwegii*, *P. ponderosa*, *P. sylvestris*, *P. radiata*, *P. montezumae* y *P. patula*, muestran una sensibilidad máxima a factores climáticos registrada en un anillo de crecimiento de cada año de la vida del árbol, así se podría obtener las condiciones regionales en las que se desarrolló en una escala regional por lo que son eficaces biomonitores. Permiten la realización de cronologías de una misma zona, de ahí que el *Pinus hartwegii* fue la especie elegida para el análisis.

Actualmente, las herramientas disponibles para permitir una óptima información acerca de las fluctuaciones climáticas de la zona correspondiente a la Cuenca de México son muy limitadas; la dendroclimatología al auxiliarse de las técnicas dendrocronológicas nos permite obtener información que puede usarse cuantitativamente para la estimación de dichas fluctuaciones y su influencia en el desarrollo del bosque.

Se cuenta con la experiencia de varios estudios dendroclimáticos realizados en Europa, en donde utilizaron técnicas de absorción atómica para el análisis químico de los anillos de crecimiento. En el presente estudio se aplica la técnica de PIXE, ya que es una técnica muy eficiente y permite manejar fácilmente las muestras, al tratarse de una técnica seca. Trabajos de este tipo no se habían desarrollado en nuestro país, por lo que es necesario dar a conocer la importancia del monitoreo de nuestros bosques y su potencialidad para dotar información y prever desastres ecológicos mayores.

IV. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia que ejercen tanto las fluctuaciones de temperatura y precipitación anuales, como la contaminación atmosférica en el crecimiento de los anillos de *Pinus hartwegii*, de la zona del Paso de Cortés en el Parque Nacional Iztapopo.

4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

- Elaborar una serie de tiempo, para los últimos 45 años, obteniendo una cronología para la especie de *P. hartwegii* de la zona de Paso de Cortés.
- Conocer el grado de asociación entre las variables climáticas (temperatura y precipitación) y el grosor de los anillos de *P. hartwegii* para un periodo de 45 años a partir de una correlación.
- Utilizar la técnica de PIXE, para conocer la concentración de elementos como: S, P, Cl, Cu, Zn, y Fe productos de la contaminación atmosférica, en los anillos de crecimiento de *P. hartwegii*.
- Conocer el grado de asociación y/o influencia que tienen los contaminantes emitidos a la atmósfera con respecto al grosor de los anillos y a las variables climáticas, aplicando paquetes estadísticos, tales como SPSS 10.0, Origin 7.5 y Statgraphics.

V. HIPÓTESIS

Si la especie de *P. hartwegii* del Paso de Cortés es sensible a los cambios climáticos, entonces presentará una serie deficiente en el crecimiento anual de sus anillos en correspondencia con periodos de temperatura más elevada y escasa precipitación.

Si la emisión de elementos contaminantes a la atmósfera determina las condiciones microclimáticas de la región, entonces la supresión en el crecimiento radial de *P. hartwegii* también estaría asociado a temporadas con mayor emisión de contaminantes a la atmósfera.

VI. ANTECEDENTES

Es necesario remarcar la importancia y eficacia de la dendrocronología para los aportes científicos. Esta disciplina permite conocer y predecir los sucesos climáticos importantes. En el Cuadro I se enlistan en orden cronológico las investigaciones consideradas como relevantes para el desarrollo de esta línea de investigación en el laboratorio de Contaminación Atmosférica de la FES-Z, UNAM.

Cuadro I. Antecedentes de los estudios dendrocronológicos.

AUTOR(ES)	AÑO	APORTE
Duhamell and Buffon	1737	Observaron que en una población de coníferas recién cortada, coincidía un anillo muy estrecho con una helada severa presentada 29 años atrás.
Douglass, A. E.	1901 1912	Determinó que los anillos expuestos en un tronco cortado de un pino en Flangstaff (EEUU) exhibían variaciones en el ancho. Estableció un modelo de anillos delgados y anchos en Prescott, similar al anterior, a 81 km de distancia y así creó el cofechado, método que se podía aplicar en áreas donde el crecimiento de un anillo es frecuentemente limitado por el clima.
Schulmann, E.	1954	Encuentra el árbol vivo más viejo de las Montañas Blancas de California (<i>Pinus longaeva</i>) datando los anillos y registrando 4798 años de edad.
Eggler, W. A.	1967	Desarrolla una cronología de anillos de 4 especies de pino, notando supresión de los mismos para años específicos por efecto de la actividad volcánica del Parícutín.
Fritts, C.	1976	Introdujo métodos estadísticos para analizar las marcas climáticas en una secuencia de anillos de crecimiento como base para la reconstrucción climática.
Hosker, R. P. and Lindberg, S. E.	1982	Describió la química y física de los polutantes, así como la depositación de los mismos para distintas comunidades forestales, y se simula mediante la medición de parámetros dasométricos el efecto a largo plazo en ecosistemas.
Schweingruber, F. H.	1983	Establece las bases de la dendroecología moderna, desarrollando la técnica de densitometría de Rayos-X.
BAES III, C. F. and McLaughlin S. B.	1984	Se realizó un estudio dendrocronológico y dendroquímico; determinando la relación entre la disminución del crecimiento radial en pinos, el incremento de la concentración de Fe en el cambium y floema, en el periodo en el que las emisiones de las combustiones fósiles aumentaron en un 200%
McClenahan, J. R. and Vimmerstedt, J.	1989	Aplicación de PIXE en muestras de heartwood de árboles deciduos (<i>Liriodendron tulipifera</i>) en el periodo 1965-1986, registrando 14 elementos. Concluyendo que la especie utilizada era un óptimo biomonitor.
Robles, M. G.	2003	Estudio retrospectivo aplicando dendroanálisis por PIXE, del depósito atmosférico en <i>Pinus leiophylla</i> y <i>Abies religiosa</i> en el Parque Nacional El Chico y Desierto de los Leones.

Mojica, A. M.	2003	Dendroquímica con el método de PIXE a especies de <i>Pinus montezumae</i> y <i>Abies religiosa</i> de Iztapopocatépetl y Zoquiapan para la evaluación del Depósito Atmosférico.
Razo, A. G.	2004	Registró los elementos pesados presentes en ejemplares de pino y Oyamel por la técnica de PIXE en el Desierto de los Leones y el Chico, Hidalgo.
Hernández, T. R.	2007	Comparó la concentración de elementos detectados por PIXE en anillos de dos especies de coníferas (oyamel y pino) a diferentes gradientes altitudinales para conocer la influencia del Efecto de Ladera.

De las referencias citadas en el cuadro I se utilizaron aspectos de relación de variables (diseño experimental), procedimientos metodológicos y de análisis estadístico.

Existe un gran número de referencias donde se cuantifica la concentración histórica de elementos incorporados en leño tardío y temprano, utilizando varias técnicas analíticas como: PIXE, PIGE, X-ray Florencence y AAS. Sin embargo, han quedado al margen, la misma cuantificación elemental en madera (temprana y tardía) en relación directa con el régimen climático y la ganancia en crecimiento (meses) y dormancia, lo cual hasta el momento se ha referido en la literatura consultada.

Las condiciones climáticas son mayormente dominadas por el patrón de tiempo semiárido con una precipitación anual media de cerca de 900 a 400 mm que se conduce de oeste a este de la ciudad. Las estaciones húmedas y secas son frecuentemente bien definidas, de Junio a Septiembre y de Octubre a Marzo respectivamente.

Por las características geográficas antes descritas y la incidencia de las variables meteorológicas, en la ZMVM se presentan diferentes tipos de clima; según el sistema de clasificación climática de Köpen, modificado por García en 1973 (Figura 2), para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana, el clima en el centro y en el sur de la ZMVM se define como templado subhúmedo con lluvias en verano (Cw_0 , Cw_1 , Cw_2 y $Cb'w_2$). Por su parte, el INEGI (2002) señala que en poco más del 80% del territorio de la ZMVM el clima es templado. García (1973) también define que en el noreste de la ZMVM el clima es semiárido templado con verano cálido ($Bs_1 kw$).

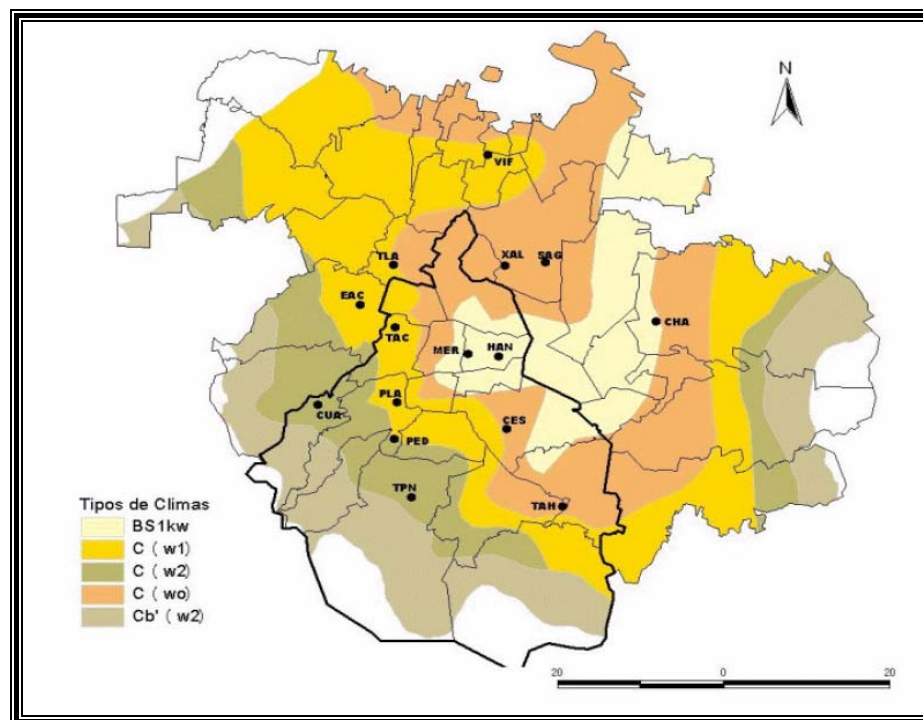


Figura 2.- Tipos de clima en la ZMVM.
SIMAT 2006, con datos "Geo Ciudad México, 2003"

Las condiciones que caracterizan al clima de la ZMVM, son un factor determinante en la calidad del aire que predomina a lo largo del año (Proaire, 2002-2010), por esta razón es importante caracterizar su comportamiento anual, temporal

y diario, y su relación con la presencia de contaminantes atmosféricos específicos (Muñoz et al, 2006).

7.1.2 Régimen Climático de la ZMVM.

El término "Régimen Climático" se usa en climatología, para caracterizar la distribución estacional de uno o más elementos en un lugar específico. Para el caso de la ZMVM, estos elementos se han visto alterados por la aglomeración de la ciudad y zonas conurbadas del Estado de México; además de la actividad industrial, y la sustitución de pastizal por asfalto y de bosques por concreto (Munguía y Pérez, 2003).

Temperatura.- la temperatura ambiente a nivel de superficie depende de la insolación y esta última es una función de la cantidad de radiación solar incidente, de la distribución de calor debido a las grandes masas de aire y del calentamiento desigual del terreno. En los grandes centros urbanos el cambio de uso de suelo y el calor que provoca el consumo de energía ocasiona un incremento significativo de la temperatura.

Según Jáuregui (2000), en la Cuenca donde se ubica la Ciudad de México el régimen térmico está dentro de los límites de comodidad ambiental, ya que en la planicie el promedio anual oscila entre 15° y 16°C, y en las montañas entre 12° y 14°C (fresco a frío). En el sur donde se concentra una región con cubierta vegetal, la temperatura es menor y hacia el centro de la ciudad, la temperatura se incrementa.

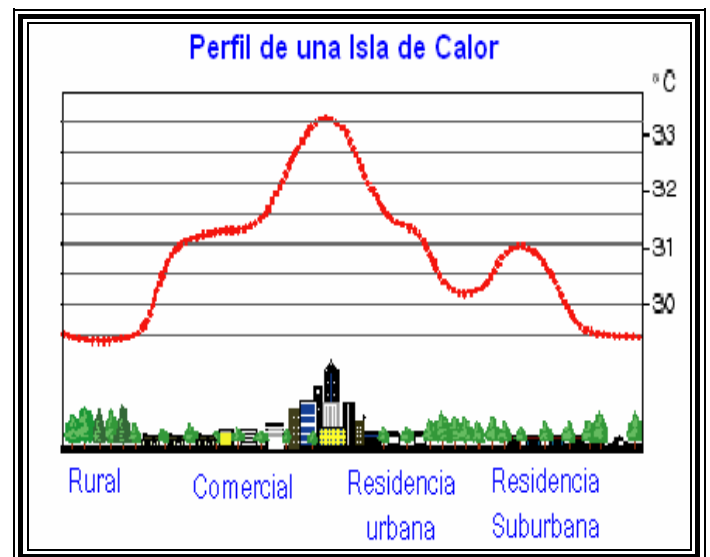


Figura 3.- Isla de Calor como efecto urbano, turbulencia térmica y turbulencia mecánica de la ciudad.
http://telstar.ote.cmu.edu/environ/m3/s2/08reg_local.shtml

Este fenómeno se magnifica en ciertas horas del día cuando el aire se vuelve más seco y la temperatura de una zona se eleva con respecto a su entorno, dando

lugar a las “Islas de Calor” (Figura 3), fenómeno que también está asociado con el tránsito vehicular y la obstrucción del viento debido a la altura de los edificios.

Precipitación.- En el Valle de México se perciben dos ciclos climáticos: la estación húmeda, de mayo a septiembre, en la que los cielos permanecen nublados la mayor parte del tiempo aunque la lluvia suele presentarse desde la tarde hasta la noche; en la estación seca, correspondiente a Octubre-Abril la insolación aumenta las concentraciones de ozono, producido por el smog fotoquímico.

7.2 Relación entre la Contaminación Atmosférica y el Régimen climático.

La Tierra, al recibir energía del Sol, la emite en forma de rayos infrarrojos, los cuales no escapan de la atmósfera ya que especies como el CO₂ absorben esta radiación, manteniendo el calor en la superficie terrestre y determina la inmovilidad de la capa de aire frío próxima al suelo, la cual concentra los contaminantes generados por la actividad industrial y el tránsito vehicular del día anterior. Esta capa se empieza a movilizar hasta que el sol la calienta, se eleva y se dispersan los contaminantes; a este fenómeno se le denomina efecto invernadero.

El incremento de CO₂ en la atmósfera ocasiona que la temperatura global de la Tierra aumente; registro de ello es que en 1950 la concentración de CO₂ era de 306 ppm y para 1960 la cifra se había incrementado a 313 ppm; posteriormente para 1976 se 332 ppm y finalmente para el 2000 379 ppm.

Por otra parte la temperatura en la tierra aumentó 0.4°C del periodo 1850 a 1940, aunque a partir de 1945 empezó a descender lentamente. Este descenso se ha aplicado con el argumento de que cada vez hay mayor turbiedad en la atmósfera debido a la presencia de aerosoles y partículas que aumentan el albedo, contrarrestando el efecto invernadero.

7.3 Importancia de las Estaciones de Monitoreo.

Una estación meteorológica es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables de carácter meteorológico y son estratégicamente colocadas a lo largo de localidades. Está integrada por varios sensores que arrojan los siguientes datos: temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar y depósito atmosférico seco y húmedo.

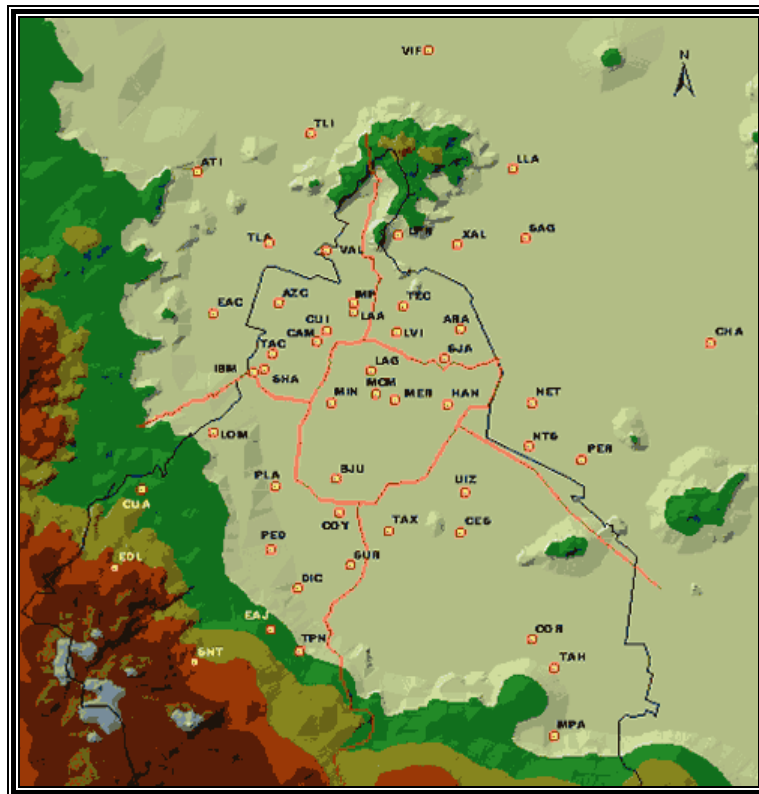


Figura 4.- Distribución de las estaciones de monitoreo atmosférico
Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

El sistema de monitoreo atmosférico de la ZMVM está integrado por 5 subsistemas operativos: la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA); la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA); la Red de Depósito Atmosférico (REDDA); la Red Meteorológica (REDMET); y la Red de Radiación Solar (REDRAS). En la Figura 4, se ilustra la distribución de las estaciones de monitoreo a lo largo de la ZMVM, la cual fue dividida en 5 zonas para facilitar la difusión de la información de calidad del aire.

7.4 Circulación de los vientos en la ZMVM.

En términos generales, se puede decir que la dirección del viento es una condición que permite el movimiento y transporte horizontal de los contaminantes atmosféricos, mientras que la velocidad determina su dilución. La dispersión vertical de los contaminantes atmosféricos está determinada por el gradiente vertical de temperatura de la atmósfera.

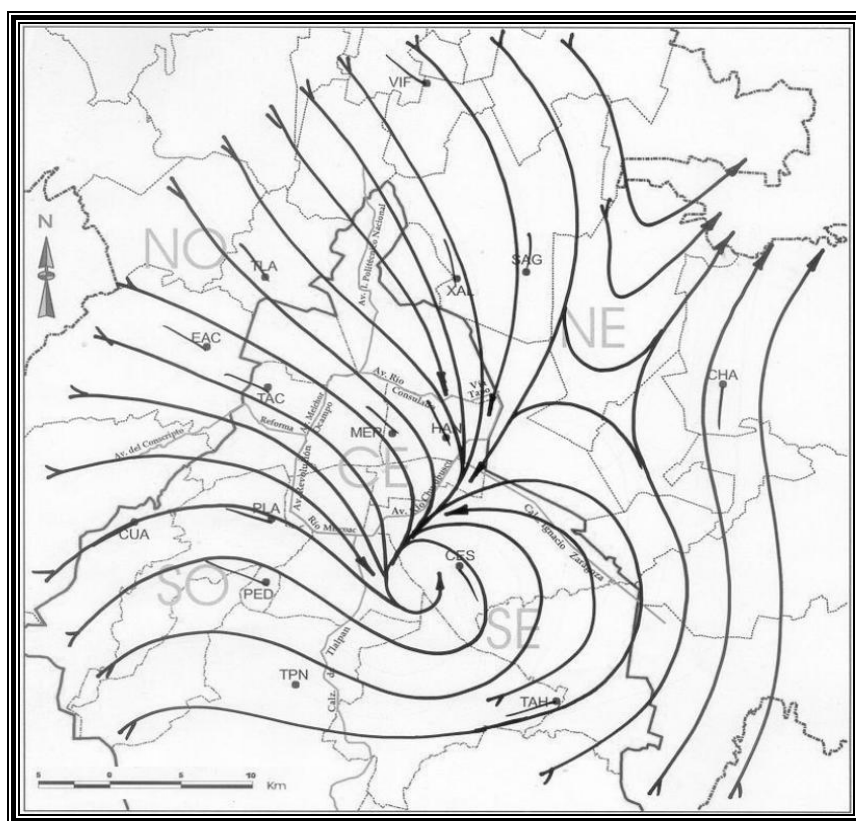


Figura 5.- Líneas de flujo de aire superficial de 13-18 hrs en Junio de 1997
En Lara, 2005

A nivel regional las condiciones del viento de la ZMVM, en cuanto a su dirección y velocidad, se relacionan con la interacción de los vientos locales y regionales (Figura 5).

Jáuregui (2000) señala que la región donde se asienta esta urbe tiene una afluencia de vientos alisios la mayor parte del año, los cuales tienen una intensidad débil con una trayectoria predominante norte-

noreste durante la época de lluvia y que pueden alcanzar hasta 40 km/h (11.1 m/s) durante los meses de marzo a mayo, en estos meses de sequía el viento puede tener una trayectoria del norte al este, sur o noreste.

Durante el invierno la incidencia de masas de aire polar provoca estabilidad atmosférica y al final de esta temporada es recurrente la presencia de una "corriente en chorro". Este sistema puede descender en los meses de febrero y marzo, e incidir con vientos de cierta velocidad en la superficie del Valle de México. En estos meses también inicia el arribo de masas de aire tropical, de manera que su interacción con

las masas de aire polar provocan movimientos erráticos y rápidos del viento. En estas condiciones las concentraciones de contaminantes como el O₃ pueden ser bajas, mientras que las partículas provenientes de la erosión del suelo se pueden incrementar (GDF-INEGI, 2002).

A nivel local existe un flujo de viento diurno que deriva del contraste térmico que ocasiona el asoleamiento diferencial entre laderas y planicies, por lo que se conocen como vientos de valle, mientras que en la noche hay un flujo de viento frío que proviene de las montañas y desciende por gravedad hacia la planicie, los cuales se denominan vientos de montaña (Jáuregui, 2000).

7.5 Efecto de la Contaminación Atmosférica en Bosques.

Las zonas forestales que circundan la cuenca del Valle de México han sido sometidas a fuertes presiones derivadas de la actividad humana (Hernández y Bauer, 1989). Los contaminantes originados en el norte de la Ciudad de México son dispersados y transportados por los vientos dominantes de dirección noroeste-noreste (Bravo *et al.*, 1991).

La contaminación atmosférica causa la llamada "lluvia ácida", que es la precipitación con altos niveles de ácido nítrico o sulfúrico. Estos ácidos afectan directamente a los organismos, como es el caso de muchos árboles que se debilitan y son invadidos por plagas. Asimismo, la alteración de la química de la lluvia en estas zonas puede ocasionar daño foliar, deficiencia nutrimental y la lixiviación de constituyentes foliares, principalmente cationes básicos como calcio, potasio, magnesio y sodio, por efecto de la disminución del pH como se muestra en la Figura 6 (Lovett *et al.*, 1985; Puckett, 1990; Liechty *et al.*, 1993).

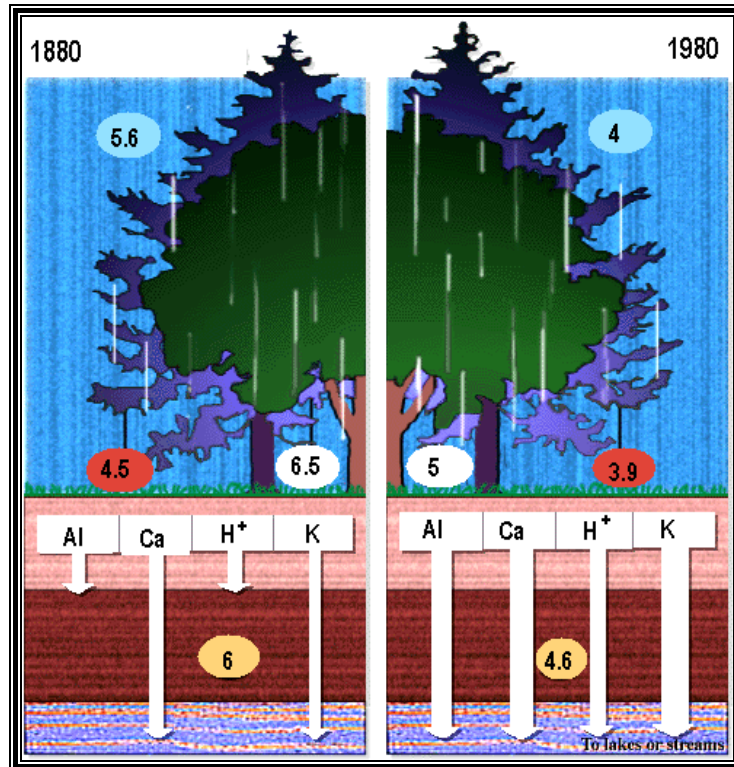


Figura 6.- Efecto de la disminución del pH como resultado de la lluvia ácida
<http://www.globalchange.umich.edu.htm>

Dado que estas alteraciones aparentemente no correspondían a la influencia de factores conocidos (cambio de temperatura, plagas, senilidad natural, etc.), se atribuyó parte del problema a los efectos directos o indirectos de la contaminación del aire (Alvarado *et al.*, 1991; López *et al.*, 1998).

7.6 Anatomía de la Madera.

La madera es una sustancia dura y resistente que constituye el tronco de los árboles. El tronco cumple tres funciones: sostén, transporte de agua y almacenamiento de sustancias de reserva. Está atravesado por una red de células longitudinales (desde las raíces a la copa) y transversales (desde la médula a la

corteza) de distintas características, que dan forma a sus tres componentes químicos básicos: celulosa, hemicelulosa y lignina, más otros compuestos secundarios como taninos, gomas, aceites, colorantes y resinas.

7.6.1 Cambium, duramen y xilema.

En las plantas leñosas, el cambium es una capa de tejido meristemático que se inicia al final del crecimiento primario. Las primeras porciones del cambium aparecen en los haces vasculares, entre el xilema y floema primario (Peichoto, et al 2000).

El cámbium produce elementos de mayor diámetro en primavera (leño temprano) y de menor diámetro y paredes más gruesas en invierno (leño tardío); la actividad de todo el año forma así un anillo de crecimiento. El cambium de cada uno de los haces vasculares se conecta entre sí formando un cilindro vascular alrededor de la planta, para así comenzar a formar xilema secundario hacia el lado interno del cambium y floema secundario hacia el lado externo.

Las células del cambium reciben el nombre de células iniciales ya que a partir de ellas se van a formar células diferenciadas y especializadas en una función específica. Estas células iniciales pueden ser de dos tipos (Sengbusch, 2000).

a) Iniciales Fusiformes: son las células cambiales que van a dar origen a todas las células xilemáticas y floemáticas orientadas en sentido paralelo al eje del órgano donde se encuentran. Son células alargadas, de extremos agudos y altamente vacuoladas.

b) Iniciales Radiales: son las células encargadas de dar origen a todas las células orientadas transversalmente. Son células pequeñas, aproximadamente isodiamétricas; se originan a partir de las células iniciales fusiformes.

Las divisiones de las células cambiales se producen cuando existen condiciones favorables para el proceso de crecimiento. Estas condiciones se refieren, principalmente, a la disponibilidad de humedad y temperaturas adecuadas para el inicio de los procesos fisiológicos de la planta. En la zona templada, el período de

crecimiento corresponde a la época de primavera mientras que en la zona tropical es en el período de lluvia.

Con la llegada del invierno (zona templada) o la sequía (zona tropical) se minimizan las condiciones favorables al proceso de crecimiento y el cambium cesa su actividad y con ello se detiene el proceso de crecimiento (León, 2001). Al observar la sección transversal de un tallo adulto (Figura 7) se pueden distinguir las siguientes partes: médula (duramen), xilema secundario (albura), cambium vascular y corteza.

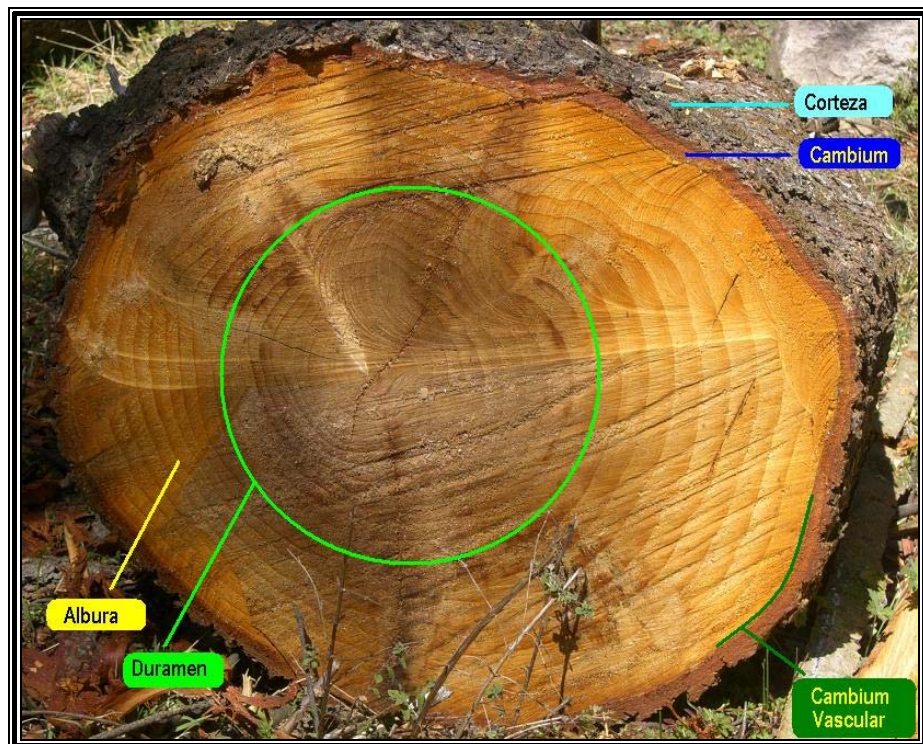


Figura 7.- Vista transversal de un tronco de conífera y partes que lo integran. Laboratorio de Contaminación Atmosférica, FES-Z; Foto: Alma R. Cruz Muñoz

Las células del xilema forman un tejido estructural y funcionalmente complejo, el cual, asociado al floema, se extiende de manera continua por todo el cuerpo de la planta. Tiene por misión la conducción de agua, almacenamiento y soporte. Puede ser de origen primario y secundario. Las células conductoras de agua son las traqueídas y los miembros de los vasos; estos miembros están unidos por los extremos formando los vasos. El almacenamiento se presenta en células parenquimáticas que se disponen en filas verticales y también en disposición radial en el xilema.

En el xilema secundario se llevan a cabo las siguientes funciones:

- a) Conducción de agua y sales minerales a través de los vasos y/o traqueídas.
- b) Soporte o resistencia mecánica a través de las fibras y traqueídas.
- c) Almacenamiento de sustancias de reserva a través de células de parénquima axial y radial.

Los elementos de conducción son células muertas en su madurez y sirven para conducir agua y sales minerales desde la raíz hasta las hojas. Pueden ser de dos tipos: elementos vasculares y traqueídas. Son células alargadas, ahusadas y con extremos cerrados (León, 2001).

En la mayoría de los árboles la parte interna del leño cesa su actividad conductora y sus células parénquimáticas mueren, debido fundamentalmente a ciertos cambios: Desintegración del protoplasma; Reforzamiento de las paredes con más lignina; Acumulación en el lumen o impregnación de las paredes con sustancias orgánicas e inorgánicas: taninos, aceites, gomas, resinas, colorantes, compuestos aromáticos, carbonato de calcio, silicio; Bloqueo de vasos con tálides.

El leño que ha sufrido estos cambios es el **duramen**, inactivo y más oscuro. Cuanto mayor es la impregnación, mayor es la resistencia a los microorganismos que provocan la pudrición. La porción clara, externa, activa, con células vivas es la albura. La proporción albura-duramen varía en las distintas especies, como también varía el grado de diferenciación entre ambas.

El xilema secundario producido durante un período de crecimiento constituye una capa, que en corte transversal de tallo se llama anillo de crecimiento. Si se observa a simple vista tiene una parte clara, que es el leño temprano o de primavera, menos denso, con células de mayor diámetro y una parte oscura, que es el leño tardío, sus células son pequeñas y de paredes más gruesas.

Médula.-Es la porción central que se observa en la sección transversal del tallo. Esta constituida por células de naturaleza parénquimática, de paredes delgadas, y cumple función de almacenamiento de sustancias de reserva (Ott-Reeves, 2000) y se origina a partir de el meristemo fundamental. Es un tejido permanente primario.

Corteza.-El término corteza se utiliza para hacer referencia a todos los tejidos que se encuentran hacia el lado externo del cambium vascular. En un árbol adulto se pueden distinguir dos tejidos principales en la corteza: el floema secundario y la peridermis (Cocks, 2000). Esto permite diferenciar dos partes: la porción externa llamada corteza muerta o ritidoma y la porción más interna conocida como corteza viva o floema secundario (Rollet, 1980).

Corteza Viva: es la parte fisiológicamente activa de la corteza y se encuentra situada entre el cambium vascular y la corteza muerta (León, 1995). Corresponde a la porción de floema secundario y esta constituida por los elementos cribosos, células parénquimáticas y, generalmente, bandas de fibras que previenen el rompimiento de la corteza (Cocks 2000).

El alimento disuelto, como la sacarosa, circula a través de las áreas cribosas que conectan estas células entre si (González y Raisman, 2000). Son los principales componentes del floema; son células que sólo poseen pared primaria, pero especialmente engrosada.

Corteza Muerta: es la parte fisiológicamente inactiva de la corteza y sólo cumple función de protección a los tejidos que se encuentran hacia el interior de la misma. También recibe el nombre de ritidoma (León, 1995). Esta porción de corteza se encuentra ubicada hacia el lado externo del último felógeno funcional (González y Raisman, 2000).

7.7 Anillo de Crecimiento.

En la sección transversal del tronco de la mayoría de los árboles del bosque templado revelará una alternancia de bandas claras y oscuras, cada una de las cuales es normalmente continua alrededor de la circunferencia del árbol. Estos son los incrementos de crecimiento estacional producidos por los tejidos meristemáticos en el cambium de los árboles (Consola, 2005).

Cada crecimiento estacional consiste de un pareado de madera temprana (menos densa) y madera tardía (más densa) que colectivamente constituyen el anillo del árbol (Figura 8).

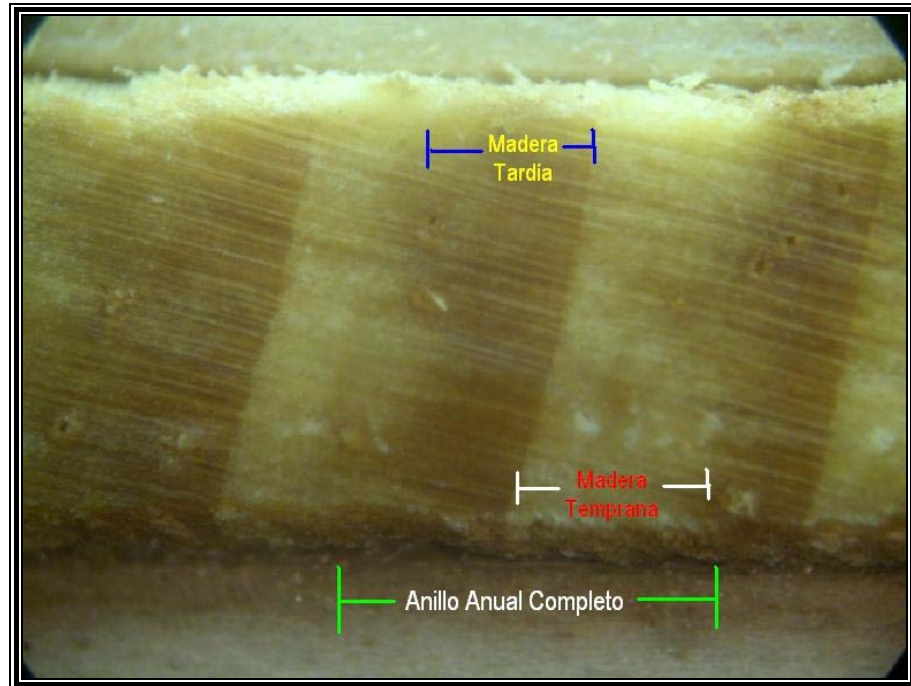


Figura 8.- Anillo de crecimiento completo de *Pinus hartwegii*. Laboratorio de Contaminación Atmosférica, FES-Z; Foto: Alma R. Cruz Muñoz

La desaceleración gradual del crecimiento de primavera hasta inactividad cambial como consecuencia de la baja temperatura da lugar a la formación de la madera tardía, que se diferencia estructuralmente del crecimiento de la estación anterior (Worbes, 2004). El ancho medio del anillo del árbol es una función de muchas variables, incluyendo la especie del árbol, su edad, disponibilidad de nutrientes del suelo y una completa multitud de factores climáticos.

7.7.1 Crecimiento de Primavera.

La madera temprana o leño primaveral es la parte de rápido crecimiento del anillo anual que se define en primavera. La madera de primavera consta de elementos celulares de mayor diámetro y menor grosor de pared, como las traqueidas

que tienen una pared muy delgada y facilitan una rápida producción de savia. En dicotiledóneas, mayor número y diámetro de vasos y menor cantidad de fibras.

7.7.2 Crecimiento de Verano.

El leño tardío crece más despacio en verano y produce células de pared más gruesa. Este desarrollo más lento crea madera dura y oscura, menos propensa a conducir savia pero capaz de proporcionar más soporte al árbol. En este caso, hay pocos vasos y de escaso diámetro, pero abundantes fibras de pared engrosada.

El límite entre una madera tardía y la madera temprana del próximo año, que se marca como una línea más oscura, está dado por la inactividad del cambium vascular en otoño e invierno.

Este criterio puede aplicarse a todas las variables de crecimiento de los árboles climáticamente dependientes, específicamente al ancho de los anillos, pero también a la densidad de la madera y las mediciones isotópicas. La madera tardía de un anillo de árbol es mucho más densa que la madera temprana y las variaciones interanuales contienen una intensa señal climática.

Las variaciones de la densidad son particularmente valiosas en dendroclimatología debido a que no cambian significativamente con la edad del árbol y pueden evitarse los procesos de estandarización, es decir remover la función de crecimiento (Consola, 2005).

7.8 Dendrocronología.

Los anillos de crecimiento de los árboles y otras plantas leñosas constituyen una fuente de información para diversos estudios científicos recientemente enfocados al biomonitoreo, cambio climático global, evaluación del proceso del decline forestal, variación en el ciclo del carbono, entre otros (Worbes 2004).

El estudio del crecimiento anual de los árboles y la reunión consecutiva de largas cronologías, para calcular fechas y determinar edades es llamada dendrocronología y utiliza como medio el reloj biológico proporcionado por los anillos de crecimiento (Baillie, 1995).

Por otra parte, el estudio de las relaciones entre el crecimiento anual de los árboles y el clima es llamado dendroclimatología, y constituye una disciplina específica que permite extraer y seleccionar la información de carácter climático contenida en la variabilidad de los datos dendrocronológicos, para ello se requiere que estos datos procedan de un conjunto amplio de ejemplares que contengan la mayor varianza común posible que se pueda relacionar con los datos climáticos (Génova y Martínez, 2003).

Las marcas climáticas registradas en el crecimiento radial de las coníferas en una serie de tiempo, como la anchura de los anillos, la densidad de la madera y la concentración de elementos, son el resultado de una interacción compleja entre las entradas ambientales y las respuestas fisiológicas del organismo (Carrer and Urbaniti, 2004).

7.8.1 Fundamentos de la Dendrocronología.

Una de las técnicas dendrocronológicas más importantes es la comparación de la serie de tiempo de un núcleo de una especie con respecto a otra (Figura 9). La variación de las características del anillo en un año específico depende de las variaciones climáticas como temperatura, radiación, y la precipitación de un año a otro. Esta variación es la razón de la existencia de los patrones únicos en los anillos y hace posible la identificación de ciertos períodos del crecimiento.

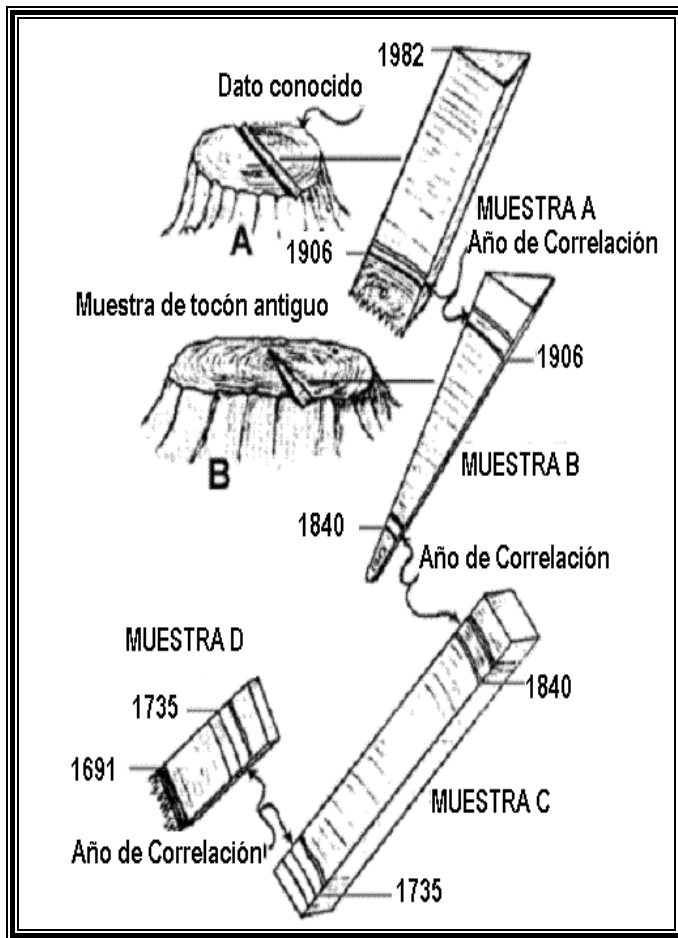


Figura 9.- Comparación entre cronologías de anillos de diferentes árboles.

<http://waynesword.palomar.edu/treedate.htm>

Las especies sensibles demuestran generalmente grandes variaciones en la anchura de sus anillos mientras que los árboles que no son sensibles o no están expuestos a zonas de crecimiento con perturbación, no muestran variación en la anchura de sus anillos.

Así como el clima influye sobre todos los árboles de una misma zona y los patrones en los anillos son similares entre los individuos de la misma, también el grado de semejanza depende de la distancia entre los sitios crecientes, la variabilidad climática en una región y la gama ecológica de una especie arbórea (Worbes, 2004).

La anchura o grosor del anillo es el elemento principal en la dendro-cronología. Este proceso se realiza de forma muy precisa, iniciando con la toma de muestra, un núcleo obtenido por el barrenamiento del tronco y seguido por la aplicación de un análisis minucioso, a través de un equipo semiautomático y programas informáticos específico, como el Windendro 2002 o DENDROCLIM2002++AC (Biondi and Waikul, 2004).

Estos programas permiten un análisis de los patrones de crecimiento de las secuencias temporales y en tal caso, de las perturbaciones que pueden modificar la tendencia aproximada a una exponencial decreciente debido a la edad (Biondi and Waikul, 2004).

Sincronización y datación. Mediante diferentes técnicas visuales, gráficas y estadísticas de comparación por solapamiento entre numerosas series de crecimiento se detectan errores y anomalías hasta conseguir un conjunto de secuencias adecuadamente sincronizadas, en las que se pueden hacer corresponder cada medición de anillo con el año concreto en que fue formado. Este proceso es otro de los pilares básicos de la dendrocronología y consiste fundamentalmente en la identificación y corrección de irregularidades como heridas o anillos múltiples, discontinuos o ausentes (Génova, 2003).

Estandarización. Para analizar la variabilidad común de las secuencias de crecimiento datadas, que proceden generalmente de árboles de diferentes edades, es indispensable aplicar modelos y filtros que minimicen la tendencia como resultado de la edad u otras oscilaciones individuales (debidas a competencia, daños o enfermedades) y transformar las secuencias en series temporales estacionarias respecto a la media, conservando oscilaciones de periodo corto, especialmente anuales.

La relación del crecimiento con el clima se analiza mediante modelos que determinan la respuesta a las variables meteorológicas que queda reflejada en las fluctuaciones de las series dendrocronológicas y requiere que los registros meteorológicos presenten datos continuos durante, al menos, treinta años y que sean representativos (Génova, 2003).

Reconstrucción Dendroclimática. Empleando las cronologías como estimadores de las oscilaciones climáticas y tras asumir que la relación comprobada para el periodo en que hay datos climáticos será similar a lo sucedido en el pasado. Para ello se utilizan diferentes técnicas, entre otras es muy habitual obtener la función de transferencia, que permite reconstruir variables mensuales, estacionales, anuales e índices climáticos con resolución anual, según presenten una suficiente y fiable varianza explicada. Este tipo de reconstrucciones se encuentran limitadas por la longevidad de los árboles y así, son escasas las que superan el milenio.

Las variables climáticas que se estiman con mayor fiabilidad son las más limitantes para el crecimiento y, como las series dendrocronológicas más largas suelen proceder de viejos árboles que habitan en alta montaña o en elevadas latitudes, donde la temperatura constituye el principal factor limitante del crecimiento, son más frecuentes las reconstrucciones de variables térmicas.

7.8.2 Aplicaciones de la Dendrocronología.

Cada vez que el crecimiento del árbol está limitado directa o indirectamente por alguna variable climática y la limitación puede ser cuantificada y fechada, la dendroclimatología puede usarse para reconstruir alguna información acerca de las condiciones ambientales que predominaron en el pasado.

Solo para los árboles creciendo cerca de las extremidades de su amplitud ecológica, donde están sujetos a estrés climático considerable (Figura 10), es probable que el clima sea un factor limitante (Consola, 2005). Por otra parte, las condiciones climáticas previas al periodo de crecimiento pueden pre-condicionar los procesos biológicos dentro del árbol y de aquí influir energicamente en el posterior crecimiento.

En consecuencia, en el registro de los anillos arbóreos, pueden verificarse fuertes correlaciones seriadas o autocorrelaciones. Un anillo de árbol específico contendrá información no solo de las condiciones del clima de los años de crecimiento sino también información sobre los meses y años precedentes (Consola, 2005).

Por tanto, se debe considerar esta disciplina como un instrumento eficaz para la realización de estudios de variabilidad climática que nos permita descubrir cómo fue el pasado climático, numerosas teorizaciones sobre el denominado "cambio climático", necesitan de métodos cuantitativos fiables (Iraolagoitia y Ruíz, 2003).

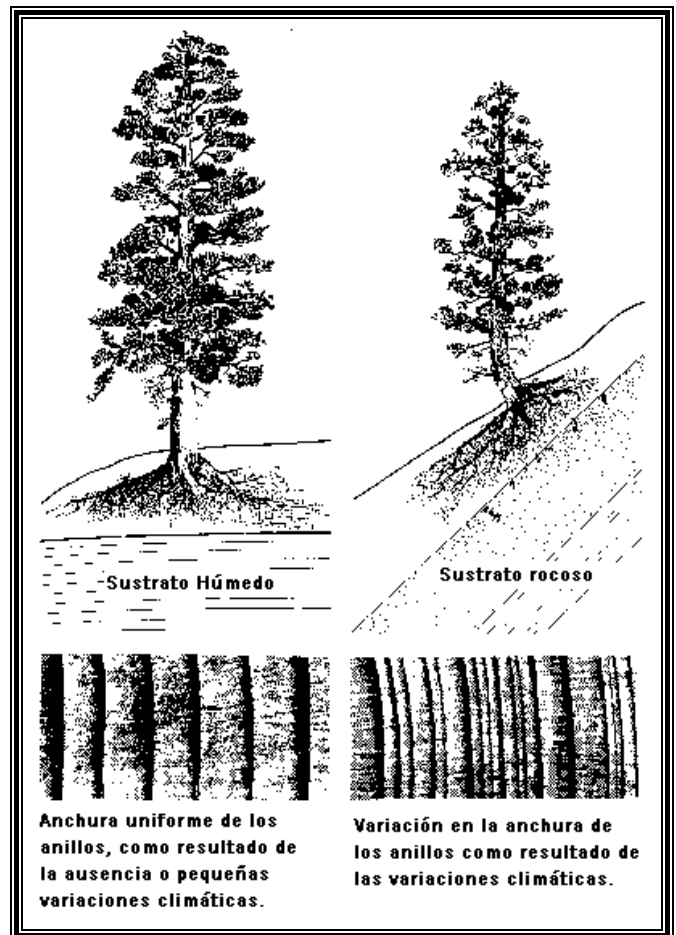


Figura 10.- Diferencia de patrones de crecimiento radial
http://www.geo.arizona.edu/palynology/geos462/tr_snsco.gif

7.9 Relación entre el Crecimiento Radial y el Clima.

El crecimiento radial y los parámetros relacionados en un tiempo dado, integran a menudo los efectos climáticos de años tanto recientes como pasados y son modificados más a fondo por factores internos y externos de la zona en cuestión (Figura 11). En estudios dentroclimatológicos se asume generalmente que las relaciones entre el clima y el crecimiento son independientes de la edad, una vez valorada la tendencia del crecimiento biológico y que se haya removido la influencia por los disturbios (Fritts 1976).

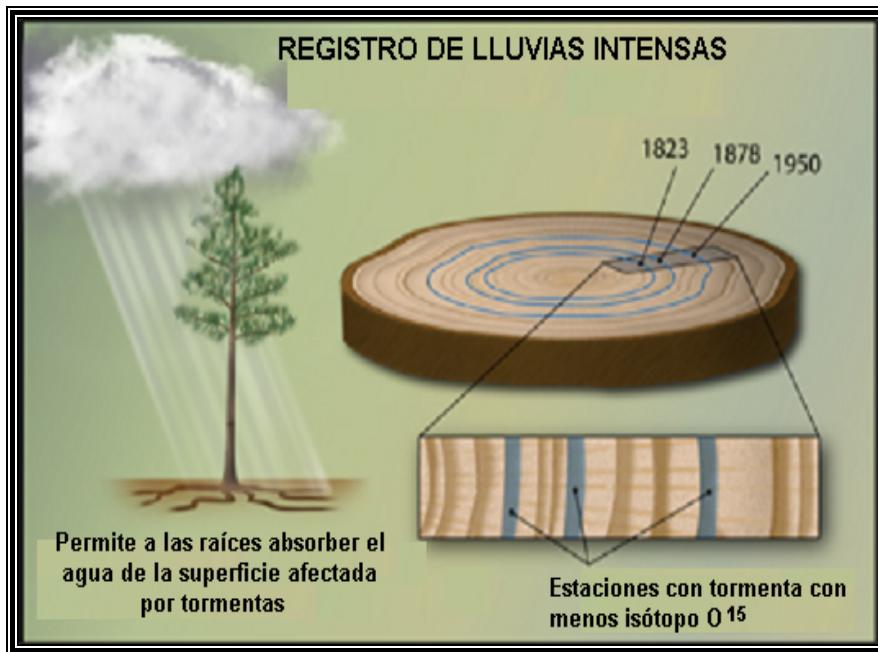


Figura 11.- Registro de importantes sucesos climáticos en los anillos anuales de crecimiento.

http://img.qj.net/uploads/articles_module/67040/tree_rings_f.jpg

Actualmente esta suposición es válida solamente si las tendencias biológicas son dadas por la restricción geométrica de la adición anual de madera al tallo por acción del crecimiento radial y/o por la competencia y otros efectos de disturbios (Szeicz and

MacDonald 1994, 1995).

Las condiciones climáticas previas al período de crecimiento pueden precondicionar los procesos biológicos dentro del árbol y de aquí influir energicamente en el posterior crecimiento. Cada vez que el crecimiento del árbol está limitado directa o indirectamente por alguna variable climática y la limitación puede ser cuantificada y fechada, la dendroclimatología puede usarse para reconstruir alguna información acerca de las condiciones ambientales pasadas (Consola 2005).

7.10 Evidencia del estrés en los árboles.

La respuesta fisiológica de los árboles a condiciones de estrés, se refleja claramente en el crecimiento radial. El aire de la Ciudad de México, está cargado de contaminantes sólidos, líquidos y gaseosos, 80% de esas partículas puede crear una nube de contaminación, éstas se comportan como núcleos de condensación de la

humedad atmosférica y generan una bruma cuya toxicidad está en función de los elementos que transporte.

Al existir un desequilibrio en la composición natural de la atmósfera, se genera inestabilidad a corto o largo plazo en el régimen climático, principalmente en los índices de temperatura y precipitación. Como la disponibilidad de recursos para el árbol se ve limitada, la respuesta es el mayor aprovechamiento posible de recursos y la necesidad de funciones alternativas para su desarrollo (Ciesla, 2002). Por lo tanto, el crecimiento radial se ve afectado al carecer de suficiente agua y de temperaturas poco óptimas, generando anillos muy estrechos para la época de primavera, y mucho más densos y más estrechos aún para invierno.

7.11 Técnica de PIXE

PIXE proviene de sus siglas en inglés: Particle Induced x-Ray Emisión, desarrollada principalmente en los años 70's (Johansson, 1998). La técnica PIXE se basa en el uso de aceleradores de partículas y consiste de dos partes. La primera es para identificar las especies atómicas en la muestra blanco, de las energías de picos característicos en la emisión del espectro de rayos X; y la segunda parte consiste en determinar la cantidad de un elemento en particular presente en la muestra, dependiendo de la intensidad de su emisión de rayos X característico en el espectro. Lo anterior requiere conocer la ionización de la sección transversal, la fluorescencia emitida y los coeficientes de absorción (Govil, 2001).

Los rayos X cuantificados provienen de las capas atómicas superiores del material que se analiza (Figura 12). Además permite determinar la composición de elementos con número atómico superior a 11 (sodio), con una alta sensibilidad (menores a mg/g) y rapidez (algunos minutos por muestra). La superficie analizada (o grosor de la muestra estudiada puede alcanzar de 100 a 200 mm en materiales biológicos (Ruvalcaba, 2001).

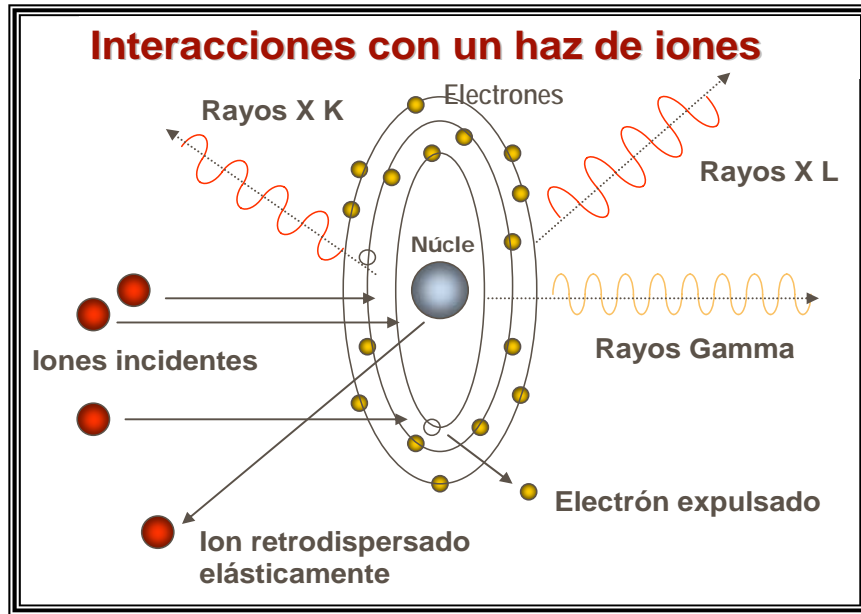


Figura 12.- Fundamento de la Técnica de PIXE.
Javier Miranda

El objetivo primordial de dichos estudios es obtener información relevante del problema biológico específico (muestra) a partir de la composición elemental traza, del material estudiado. Los elementos traza tales como Cr, Mn, Co, Zn, Se, Mo y otros como Sr, Al y Fe son indispensables para el adecuado funcionamiento de los sistemas biológicos. Con PIXE es factible determinar la concentración de prácticamente todos los elementos mencionados, además de elementos constitutivos mayores de los sistemas biológicos como K, Ca, Cl, S y P de importancia vital. (Ruvalcaba, 2001).

7.12 Descripción de la Especie *Pinus hartwegii* Lindl.

También se le conoce como Pino de las alturas. Es un árbol de 15 a 30 m de altura, posee corteza agrietada, de color pardo rojizo, con ramas extendidas e irregularmente colocadas, con ramillas muy ásperas, (Figura 13). En la forma más típica se observan 3 hojas que miden de 10 a 16.5 cm de largo, de color verde claro. Presentan estomas en las tres caras.

Tienen dos haces vasculares, muy aproximados o casi contiguos, rodeados de células de refuerzo; las paredes exteriores de las células endodérmicas son delgadas o levemente engrosadas en algunos casos.

Sus yemas largamente ovoides, agudas, de color café rojizo. Los conos largamente ovoides, ligeramente oblicuos y en ocasiones levemente encorvados, extendidos o algo reflejados regularmente entre 9-10 cm de largo. Se presenta generalmente por pares, pero a veces en grupos de tres, cuatro y cinco.



Figura 13.- Ejemplar de *Pinus hartwegii* en el Paso de Cortés. Laboratorio de Contaminación Atmosférica FES-Z; Foto: Alma R. Cruz Muñoz.

Al caer el cono suele quedar el pedúnculo en la ramilla con algunas escamas basales. La madera es dura y resinosa y aquí radica precisamente el uso en la producción de brea y trementina, su tallo y las ramas se usan para producir leña.

P. hartwegii se halla entre 16°20' a 25°03' LN y 92° 20' a 103°55' LW, entre 3000 y 4000 m de altitud (Musálem y Solís, 2000). *P. hartwegii* es un pino que crece a gran altitud alcanzando la línea de las nieves perpetuas. Solís (1994) ha indicado que como las poblaciones de esta especie se desarrollan a mayores elevaciones sobre el nivel del mar, cumplen funciones de protección a otros recursos y amortigua los efectos de contaminación ambiental, además que contribuye, como regulador del ciclo hidrológico producto del deshielo de los volcanes, alimenta de agua a los mantos freáticos.

VIII. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El nombre oficial donde se encuentra la zona de estudio es Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl, Zoquiapan y Anexas; está conformada por los Parques Nacionales Iztaccíhuatl Popocatepetl y el Parque Nacional Zoquiapan con sus alrededores. Forman parte de un mismo corredor biológico, conformando una unidad geográfica y biótica.

El área citada, cuenta con una superficie de 45 097 ha, de las cuales 25 679 ha pertenecen al Izta-Popo y 19 418 ha para Zoquiapan. Ocupan parte de los Municipios de Texcoco, Ixtapaluca y Tlalmanalco, Amecameca, Atlautla y Ecatzingo en el Estado de México, así como Tlahuapan, San Salvador el Verde Domingo Arenas, San Nicolás de los Ranchos y Tochimilco, en el estado de Puebla y Tetela del Volcán en Morelos.

La zona tiene como característica, diversidad en condiciones climáticas, debido a su topografía y ubicación. La variedad de clima abarca desde un clima de tipo templado húmedo hasta un clima frío a muy frío. Existe una red de estaciones meteorológicas en el área de influencia del Parque Nacional Iztapopo, sin embargo no se cuenta con estaciones a una altura mayor a 4000 msnm. Por lo que no se tienen registros de las zonas más frías y que es donde se presentan los glaciares y las nieves eternas.

De acuerdo con su latitud, el Parque se ubica en la región de los vientos alisios en una zona donde predominan las circulaciones de tipo convectivo local, lo cual hace posible una gran estabilidad meteorológica durante la mayor parte del año. A pesar de que durante el verano el país recibe la influencia de los vientos provenientes del Caribe y del Atlántico, los cuales inciden con vientos húmedos; en cambio, durante el invierno, el cinturón de altas presiones y la faja de vientos del Este, son desplazados hacia el Ecuador, con lo que se forman vientos del Oeste sobre las partes altas del país y debido a

que son más secos que los vientos alisios, durante esta época la Altiplanicie tiende a tornarse más seca.

8.1 Parque Nacional Iztapopocatépetl.

Es decretado Parque Nacional el 7 de noviembre de 1935 por el presidente Lázaro Cárdenas. Abarca varios municipios de Puebla, Estado de México y Morelos (Melo y Oropeza 1977; citado por Calva, 1999). Su ubicación geográfica es de 18°59'00'' y 19°16'25'' LN y 98°34'54'' y 98°42'08''. Aquí está ubicado el pasaje que corresponde al Paso de Cortés (Figura 14).



Figura 14.- Zona de Muestreo (Paso de Cortés, en el Parque Nacional Iztapopocatépetl)
<http://www.techno-science.net/forum/viewtopic.php>

Clima.- El clima es templado semifrío subhúmedo. La mayor incidencia de lluvias se registra en el mes de julio, con un rango que fluctúa entre 200 y 201 mm; la mínima corresponde a febrero, con un valor menor de 10 mm. La máxima temperatura se

presenta en los meses de abril y mayo, con un valor entre 12 y 13 °C; los meses más fríos son enero y diciembre, ambos con una temperatura que oscila entre 8 y 9 °C.

Flora.- Obviamente cada zona se caracteriza por su gradiente altitudinal. Así pues a partir de los 2,500 m a los 4,000 m encontramos bosques perennifolios del género *Pinus*, en la franja más alta predominan el *Pinus hartwegii*, seguido de *Pinus montezumae* y *Pinus pseudostrobus*; acompañados algunas veces por *Pinus leiophylla* y *Pinus teocote*. A veces se presentan conviviendo con *Quercus*, *Juniperus* o *Alnus*, en suelos Andosol o Litosol.

IX. MATERIAL Y MÉTODO

9.1 Fase de Gabinete.

Revisión bibliográfica. Fue necesario realizar una exploración acerca de los trabajos relacionados con la línea de investigación. Consultando artículos y libros con información actualizada (Ver Cuadro I, de antecedentes).

Revisión de Páginas Electrónicas. Para trabajos enfocados en relacionar dos variables o más a través de cierto periodo de tiempo (SO_2 , NO_2 , CO y PST), fue necesario respaldarse en bases de datos que proporcionaran esta reseña, consultando páginas gubernamentales (SMA, CNA y SIMAT, 2004) y descargándose archivos que datan de hasta 20 años de datos.

Para la obtención de los parámetros meteorológicos, fue necesario reunir los datos personalmente en las Instalaciones del Servicio Meteorológico Nacional, ya que los datos generados por la estación más cercana a la zona de estudio (San Luis Ameca), no se encontraba actualizada en la base de datos de esta Institución.

9.2 Fase de Campo.

Elección de Zonas y Especies. Para el muestreo de núcleos, fue necesario ubicar en un mapa topográfico de la zona de estudio, las altitudes a las que se deseaban muestrear, eligiendo el Paso de Cortés, a una altura de 3800-4000 msnm (Figura 15). Una vez en el lugar, se eligieron los ejemplares adecuados, los cuales no debían de presentar daño o deformación en el fuste (bifurcado, ocoteado, quemado o talado), así como medir más de 120 centímetros de circunferencia del tronco a la altura del pecho del investigador (Stokes y Smiley, 1968), como se ilustra en la figura 16-A).



Figura 15.- La zona de muestreo en el Paso de Cortés, orientación sureste. Laboratorio de Contaminación Atmosférica FES-Z; Foto: Alma R. Cruz Muñoz

En la bitácora se registraron los datos correspondientes a la especie, usando un geoposicionador MAGELLAN SporTrak para la ubicación geográfica y la altitud. Se midió la circunferencia del tronco con un flexómetro, a la altura del pecho del investigador la cual debía ser mayor a 120 cm y se calculó la altura de la especie con un Spiegel-Relaskop.

Extracción del Núcleo. Se ubicó el área de extracción en el plano perpendicular a la pendiente del terreno para extraer el núcleo y se barrenó con un taladro Pressler de 40 cm de longitud y 5 mm de diámetro en el mismo sentido de las manecillas del reloj a la altura del pecho como se observa en la Figura 16-B) (Fritts, 1976), el núcleo obtenido se colocó en un popote de plástico, etiquetado con sus respectivos datos y fue nombrado Núcleo A (Figura 16-C), se efectuó el mismo procedimiento en la cara contraria del tronco para obtener el Núcleo B.



A)



B)



C)



D)

Figura 16.- Extracción del Núcleo. (A) Medición de las variables dasométricas de la especie; (B) barrenamiento con el taladro Pressler; (C) Extracción del núcleo; (D) Introducción de madera con solución antiséptica en la lesión del tronco.

Por otra parte, la perforación realizada por el barrenamiento fue sellada con cilindros de madera (Figura 16-D), previamente impregnados en una solución antiséptica de formol/alcohol 1:10 para evitar que el árbol estuviera propenso a una invasión por hongos o insectos y para promover su compartimentalización. Todos los popotes se colocaron en una caja para transportarlos al Laboratorio de Contaminación Atmosférica de la FES-Z.

9.3 Fase de Laboratorio.

Secado, Montaje y Rasure de Núcleos. Se colocaron los popotes con las muestras en una estufa Kinet, durante 2 días a 40°C, para secar los núcleos y evitar la invasión de hongos y/o bacterias por humedad (Figura 17-A). Para la manipulación de los núcleos en el Laboratorio, fue necesario utilizar guantes esterilizados para evitar la contaminación de los mismos.

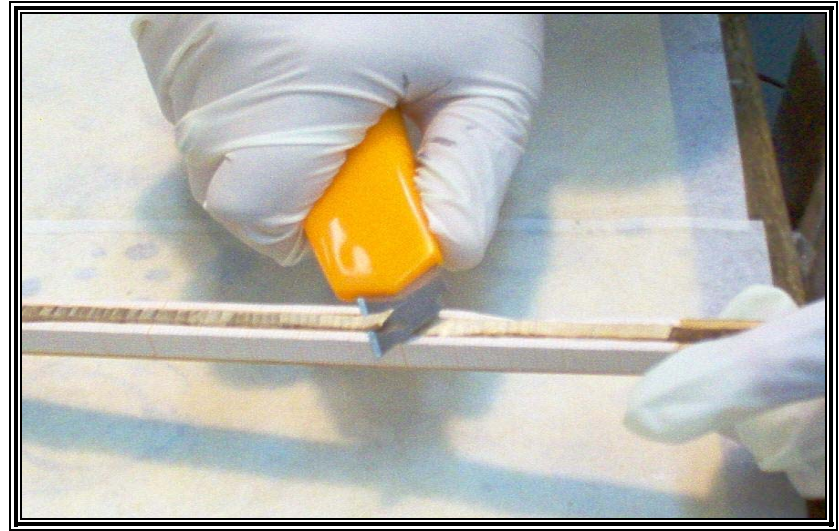
Posteriormente, las muestras se trasvasaron a bastidores de madera de 40 cm de longitud, con un canal de 5 mm de ancho y 2 mm de profundidad previamente etiquetados, y se procedió a orientar, dejando expuesta la cara transversal del núcleo que reflejó la luz; se adhirió firmemente al bastidor con pegamento. Una vez seco, se recortó la cara expuesta con una navaja de acero inoxidable (Figura 17-B), obteniendo una superficie plana, facilitando la apreciación de los anillos.

Marcaje y Conteo de Anillos. Se adhirió papel milimétrico en una pared del bastidor y con un estereoscopio MOTIC modelo DMW143 y resolución 4X; se marcaron los anillos visibles o bien se agregaron unas gotas de agua desionizada a lo largo del núcleo para clarificar los anillos. A continuación, se midieron las anchuras de los primeros 45 anillos con un Vernier (Figura 17-C) y se registraron las mediciones en un formato.

Posteriormente, de un total de 24 núcleos, solo 12 fueron aptos para la Sincronización, es decir, fueron comparados para eliminar los anillos dobles o ausentes,



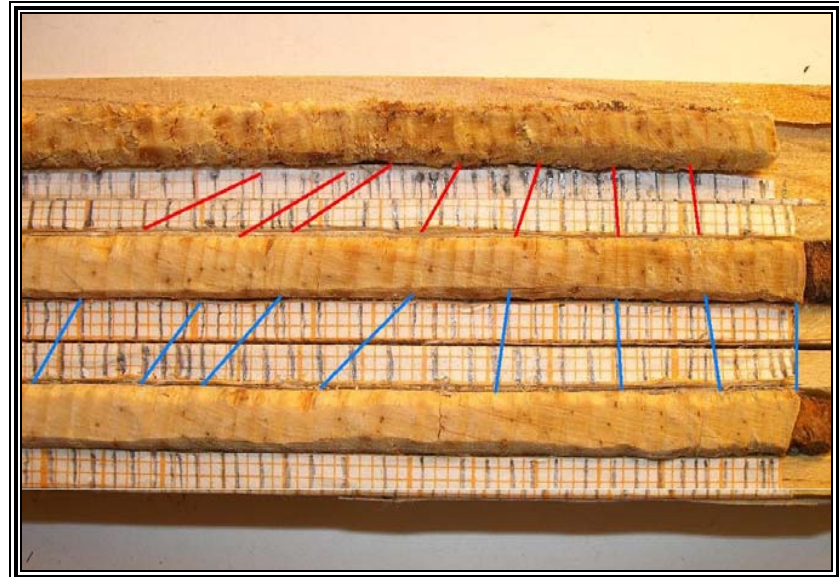
A)



B)



C)



D)

Figura 17.- Tratamiento de la Muestra. A) Secado de los núcleos en estufa; B) Traslado y rasado con navaja de acero inoxidable; C) Medición de anillos con Vernier (con una incertidumbre de 0.05 mm); D) Entrecruzado de núcleos

así como los errores en la identificación o conteo de los mismos (Figura 17-D), utilizando crossdating (entrecruzamiento de núcleos de diferentes especies), obteniendo índices de crecimiento para su graficación y su posterior Correlación, partiendo de la curva de los índices de crecimiento, se buscó la relación numérica entre la curva y los datos locales meteorológicos (pp y T°, obtenidos de la Estación Meteorológica "San Luis Ameca" ubicada a 19°11' LN y 098°58' LW, y con una altitud de 2450 msnm) de los últimos 45 años.

Para esta sección fue necesario usar programas de estadística como Origin 7.0, SPSS y StatGraphics, permitiendo diseñar gráficas y obteniendo valores numéricos para interpretar la asociación de cada una de las variables obtenidas.

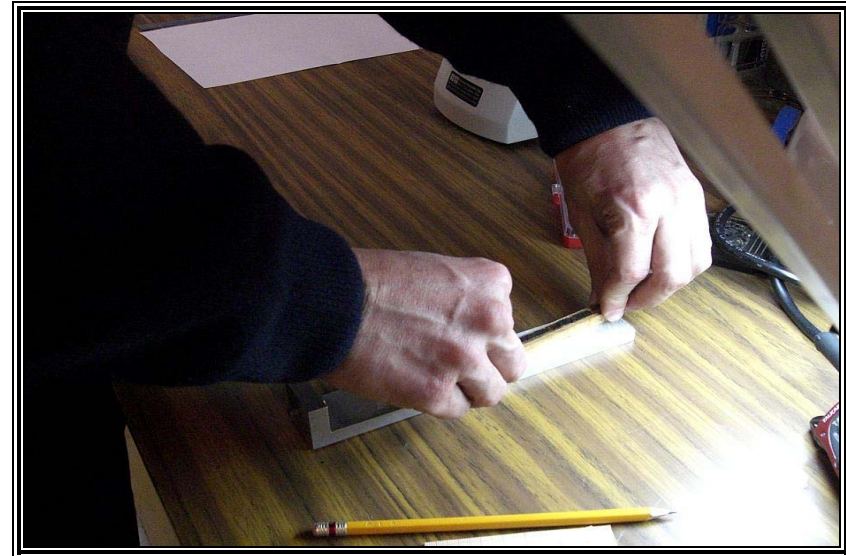
Aplicación de PIXE. Para el análisis químico, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Peletrón del Departamento de Física Experimental en el Instituto de Física de la UNAM. Los bastidores son adheridos a una placa metálica, colocada a su vez en un tripie para facilitar el cambio de los anillos. Los primeros 30 anillos de 10 núcleos fueron sometidos a la técnica de PIXE (Particle Induced Ray-X Emisión).

Las condiciones de la óptica fueron: a un ángulo de 45° y con una energía de 3.3 MeV de salida de haz de protones que incide en la superficie de la madera que conforma el anillo de crecimiento, penetrando de 2 a 3 mm de profundidad de la superficie.

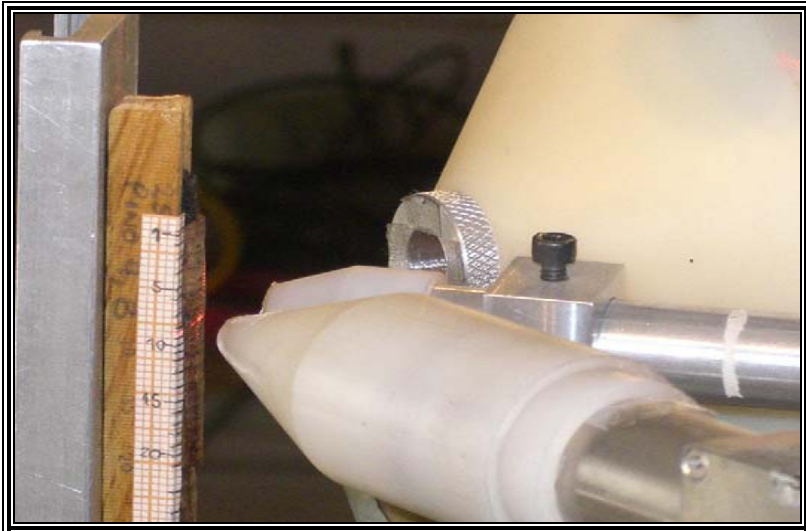
Los rayos X son cuantificados en un detector de estado sólido de Si(Li) y Li(Ge), después son llevados a una tarjeta multicanal (mediante un proceso de electrónica asociada), donde las energías producidas se acumulan manifestándose en forma de espectros de energía, los cuales fueron procesados con los paquetes AXIL y PIXE INT haciendo posible conocer los elementos presentes en cada anillo, así como las unidades de concentración.



A)



B)



C)



D)

Figura 18. - Procesamiento de la Muestra en el Laboratorio de Peletrón. A) Laboratorio de Peletrón en el IF-UNAM; B) Fijación del bastidor para irradiación; C) Irradiación con protones [H+] anillo por anillo del núcleo de *P. hartwegii* y D) Consola de Control

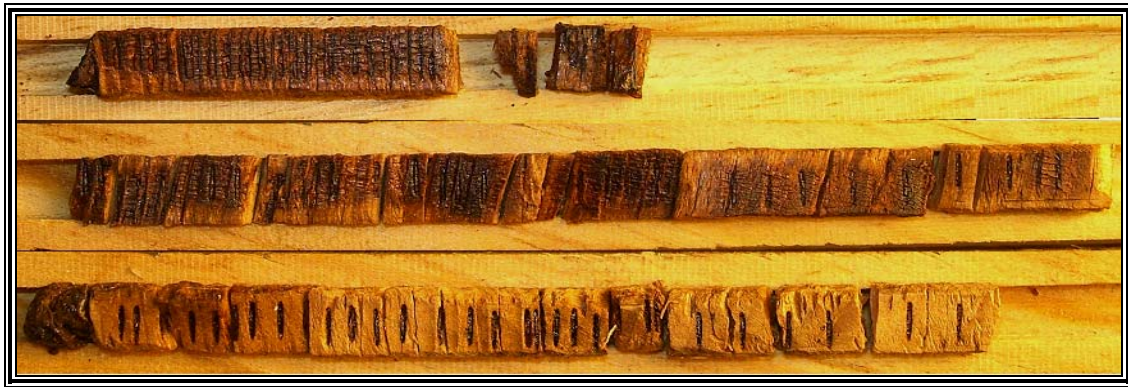


Figura 19.- Muestras pretratadas, después de 10 días de calentamiento en la estufa.
Laboratorio de Contaminación Atmosférica. FES-Z: Foto: Alma R. Cruz Muñoz.

En la Figura 18-D) se muestra el monitor de la computadora que permite el control del haz y el conteo de energía (emisión de rayos-X), se observó que en todas las muestras analizadas manifestaban un “background” producido porque la celulosa de la madera no conduce energía; por lo que hay un amontonamiento de electrones y se procedió a un pretratamiento, que consiste en someter a estas muestras a un calentamiento de 90 °C durante 14 días para eliminar la celulosa y de esa manera ya podrían ser leídas nuevamente, 6 muestras en el Laboratorio del Peletrón y fueron denominadas Muestras Pretratadas (Figura 19). La energía detectada se transmite por un espectro (Figura 20), que se trabaja con el paquete AXIL y PIXE INT para conocer el elemento presente y su concentración.

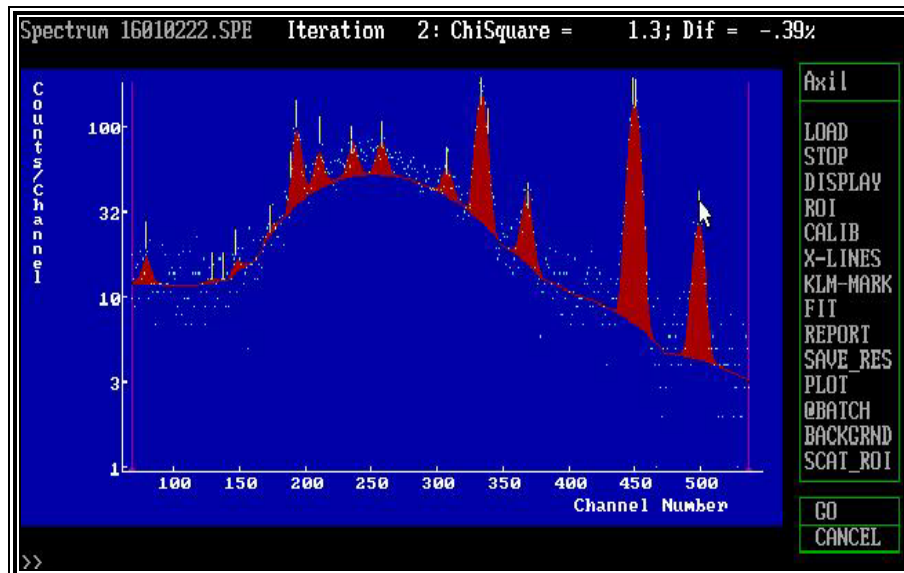


Figura 20.- Espectro de la simulación de energía reflejado de la incidencia del haz un núcleo de *P. hartwegii*.

X. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1 Anillos Anuales de Crecimiento de *Pinus hartwegii* en el Paso de Cortés.

El registro del crecimiento anual de los anillos de *Pinus hartwegii* (pino de las alturas) se ilustra en la figura 19, durante el periodo 1956-2004; entre lo más destacado se puede observar que el grosor oscila entre 1.2 a 2.3 mm de grosor durante los 49 años (Figura 20), y del intervalo de 1956-1960 el espesor del anillo prácticamente no cambia y oscila en ± 2.1 mm. Sin embargo tienden al decremento en anillos posteriores hasta 2005.

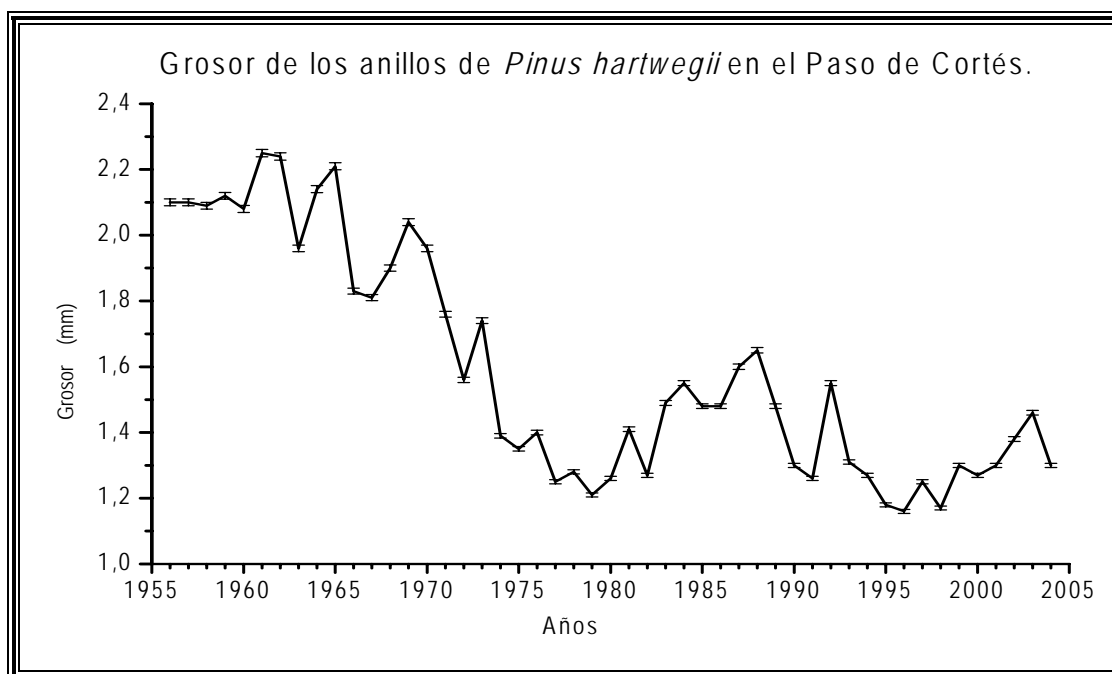


Figura 21.- Registro del grosor de los primeros 45 anillos de *Pinus hartwegii* del Paso de Cortés con barras de incertidumbre del 0.05%

El mayor crecimiento ocurrió en el intervalo 1961-1965, destacando el correspondiente a 1961 con 2.27 mm. Posterior a éste, se registró un descenso en el

grosor anual hasta llegar a valores menores que van de 1.21 a 1.40 mm en el periodo de años 1975 a 1980.

El crecimiento anual del *Pinus hartwegii* no es un fenómeno aislado, ya que depende principalmente de las condiciones climáticas y de los patrones de periodicidad de la zona en que habita (Fritts, 1976; Yeh and Wensel, 2000), por lo que es necesario discutir los factores que posiblemente influyeron durante 1975 a 1980 y en 1994 a 1998, onde la supresión del crecimiento de los anillos se hizo evidente en todas muestras analizadas (24 núcleos).

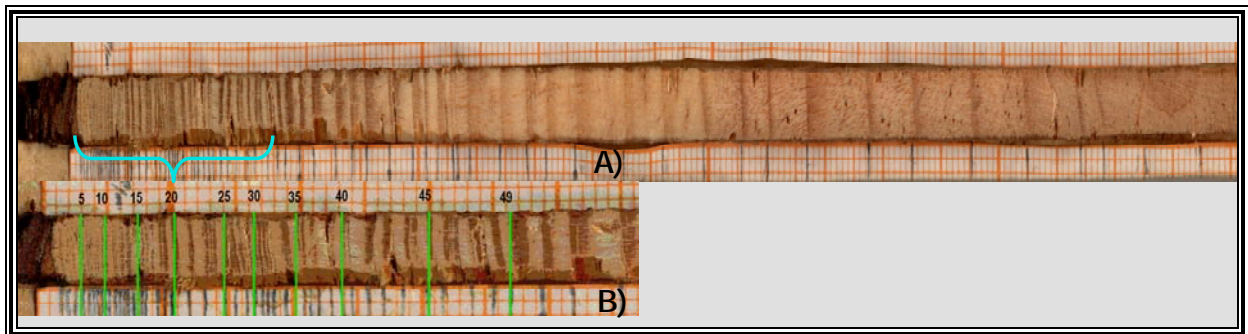


Figura 22.- A) Núcleo de *P. hartwegii*; y B) Sección de los primeros 49 anillos, mostrando quinquenios de anillos muy estrechos.

Laboratorio de Contaminación Atmosférica FES-Z; Foto: Alma R. Cruz Muñoz

De acuerdo con los registros del Servicio Meteorológico Nacional, en 1974 ocurrió un descenso de la precipitación (pp) en la zona, y paralelamente comenzó un ascenso inusual en la temperatura (T°) de casi un 8% (Anexo 1); éste aumento de T° , activa el crecimiento radial y las yemas del árbol, siendo fundamental, el recurso hídrico para las actividades metabólicas del mismo. La precipitación pluvial no se presentó de manera constante a partir de los años 1979-1990, (Figura 25), situación que se determinará a través de los anillos más estrechos para los años posteriores a estas condiciones severas.

La supresión extrema del grosor de los anillos durante el intervalo de años 1975-1980 (Figura 22), en primera instancia, se debió a que la fotosíntesis del árbol no contará con suficiente agua para la síntesis de la celulosa. Fenómeno que se agudizará por las elevadas concentraciones de partículas sólidas y de plomo provenientes de las gasolinas

(que alcanzaron un valor promedio de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de plomo) emitidos a la atmósfera desde 1968, (Halffter and Ezcurra, 1983), cuando la norma mexicana solo consideraba permisible $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

A diferencia del oyamel, el pino no responde de inmediato a condiciones de cambio extremo ambiental (disponibilidad de agua). Las características de *P. hartwegii*, que son: desarrollarse generalmente sin asociación arbustiva con el consecuente desecamiento de la superficie, encontrarse en una pendiente pronunciada y poco profunda por lo que el drenaje ocurre muy rápido, constituyen factores muy específicos para el desarrollo de la especie (Anaya et al., 1980). Por lo tanto, cuando éstos varían, el estrés del pino es inmediato.

Se puede observar en la Figura 21 que del periodo 1980-1988, el grosor del anillo aumenta paulatinamente, respondiendo a los niveles inusuales que presentan la pp y T°, sin embargo en 1988, cuando la temperatura desciende y la pp aumenta, el grosor de pino decrece marcadamente un año después en 1990, a partir del cual ha tendido a producir anillos más estrechos.

10.1.1 Influencia de la Actividad Volcánica en el Crecimiento del anillo.

Los ejemplares del *P. hartwegii* que fueron muestreados para este estudio, se encontraban en bosquetes dispersos a lo largo de la zona. La densidad de ejemplares no es uniforme y puede deberse a la intensa actividad volcánica del Popocatepetl sucedida desde 1994. De acuerdo con Biondi et al (2003), las comunidades de coníferas que se desarrollan cerca de volcanes que experimentan una erupción corren el riesgo de perecer debido a la emanación de cenizas y material piroclástico.

De acuerdo con el CENAPRED, en diciembre de 1994 y primeros meses de enero de 1995, el volcán Popocatepetl arrojó a la atmósfera cerca de 0.001 km^3 de ceniza, la cual repercutió en el decremento de los anillos de *P. hartwegii*, ya que como lo señaló Biondi et al. (2003), la ceniza altera los múltiples caminos de la fotosíntesis.

A nivel de follaje, la ceniza y el polvo atmosférico se depositan en las copas de los árboles, aminorando la actividad de la radiación; a nivel de agujas, la ceniza se acumula en la superficie, obstruyendo el tejido fotosintético y los estomas impidiendo el intercambio de gas entre la epidermis de la planta y la atmósfera; y a nivel de raíz, la capa de ceniza impide la aireación de las raíces y en consecuencia afecta el sistema químico suelo-raíz.

El decremento del anillo es determinante y en algunos casos el crecimiento suele ser nulo, esta respuesta de las coníferas puede manifestarse un año o dos inmediatamente después de la erupción volcánica, tal es el caso, de lo registrado por Egger (1967) con cuatro especies de pináceas que crecen cerca del Parícutín y con *P. hartwegii* cerca del Volcán de Fuego en Colima (Biondi op. Cit.).

Como se muestra en la gráfica, la respuesta del pino de las alturas en el Paso de Cortés se manifiesta en 1995 y 1996 perdiendo casi un 49% del grosor del anillo con respecto a los máximos grosores registrados en 1961 y 1962.

10.2 Cronología del Crecimiento Residual Anual de *Pinus hartwegii*.

A pesar del claro comportamiento que presenta *P. hartwegii* al decremento paulatino de sus anillos anuales, se hace necesario conocer la tasa de crecimiento anual, para determinar la producción neta de madera por año. En la figura 23 se observan las oscilaciones del crecimiento neto expresado en un Índice Residual, donde los picos más pronunciados corresponden a la ganancia o pérdida de madera más significativa con respecto al año anterior.

De tal manera que se pueden apreciar dos valores extremos "picos" claramente definidos, el primero corresponde al año 1974 donde el anillo presentó una pérdida considerable con respecto a la ganancia del año anterior. El segundo pico corresponde al año 1992 en el cual el índice se incrementa casi en las mismas dimensiones de 1974.

Lo anterior puede corroborarse observando la línea (rojo) que atraviesa la cronología como producto de la resolución del polinomio de segundo grado ($Y = 28,88709 - 0,02875 X + 7,27791E-6 X^2$); la tenue depresión que comprende de 1970 a 1990, refleja en un periodo de 20 años, una pérdida notoria de crecimiento. Acudiendo a la figura 23, los picos significativos que prácticamente son los límites de la depresión de la línea citada, corresponden al periodo inusual de la precipitación (pp) y la temperatura (T°).

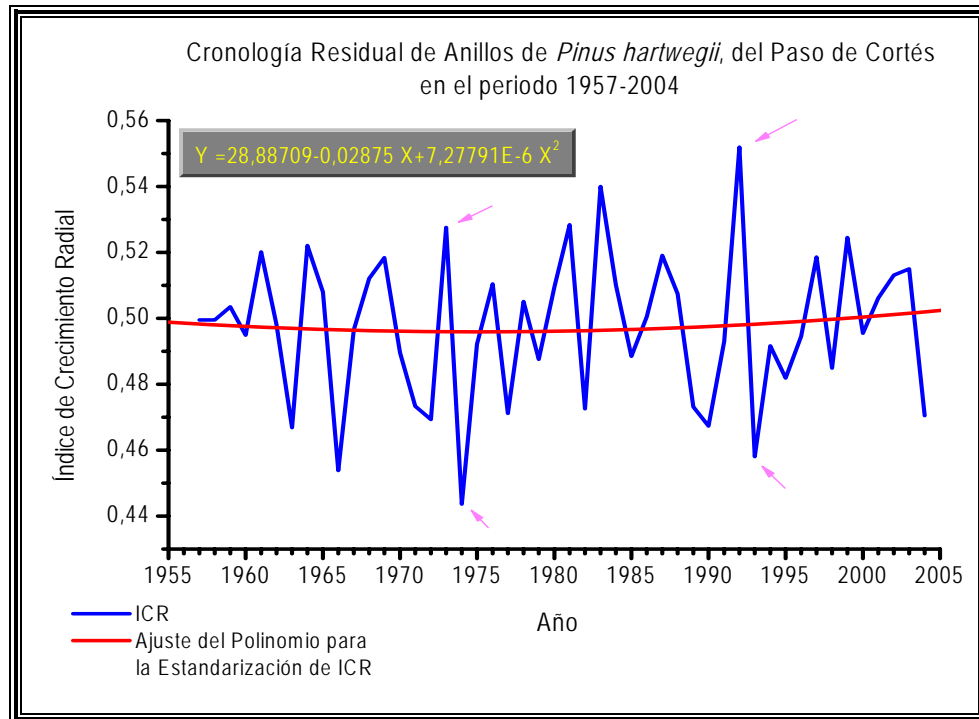


Figura 23.- Cronología del Índice de Crecimiento Residual Anual de *Pinus hartwegii* en el periodo 1957-2004.

Lo anterior puede corroborarse observando la línea (rojo) que atraviesa la cronología como producto de la resolución del polinomio de segundo grado ($Y = 28,88709 - 0,02875 X + 7,27791E-6 X^2$); la tenue depresión que comprende de 1970 a 1990, refleja en un periodo de 20 años, una pérdida notoria de crecimiento. Acudiendo a la figura 23, los picos significativos que prácticamente son los límites de la depresión de la línea citada, corresponden al periodo inusual de la precipitación (pp) y la temperatura (T°).

Si recordamos que las variables pp y T° de un año dado promueven el crecimiento del siguiente año en el crecimiento del árbol, entonces se puede deducir que para el

descenso del índice residual correspondiente al 1974, la T° influyó en gran medida y para 1973, fue la pp, en cuyos valores de 10.75°C y 706.4 mm, respectivamente, se encuentra la explicación de la poca ganancia en crecimiento.

Para el caso de la ganancia de crecimiento más evidente presentado en 1992, se registró una T° de 12.05 °C y 724 mm de pp. Comparando estos picos antagónicos, se puede observar que existe una diferencia de 1.3 °C de T° y casi 18 mm de pp, aunque hasta aquí, aún no se puede decir con precisión qué variable promueve el comportamiento de tales oscilaciones.

Cuadro II: Tabla comparativa de pp y T°

Picos Máximos	pp (mm)	T° (°C)	Registro de variables
1966	877.3	14.1	1965
1974	706.4	14	1973
1993	749.2	15	1992
Picos Mínimos			
1973	826	13.6	1972
1984	572.6	16.4	1983
1992	724.9	15.3	1991

Para conocer si los picos más representativos, tanto máximos como mínimos pueden tomarse como referencia puntual con respecto a las variables registradas un año anterior, se elaboró una tabla comparativa de pp y T°, (Cuadro II), en donde se muestra que éstas no son uniformes ni similares entre sí tanto para los años 1966, 1974 y 1993 de picos mínimos así como para los años 1973, 1984 y 1992 para picos máximos.

Esto sugiere que el crecimiento radial no está determinado específicamente por la pp y T° del año anterior al crecimiento del árbol, sino que depende o está influenciado por las condiciones climáticas de un periodo preliminar a dicho fenómeno. Para respaldar esto, volvamos a mencionar la depresión de la curva que atraviesa la cronología, en el periodo 1970-1990, donde la pp disminuye drásticamente y la T° aumenta en la misma proporción, el decremento del índice residual, de manera general podría decirse que éste responde a un estrés hídrico que promueve una lenta acumulación de carbohidratos

de reserva y por lo tanto se manifiesta en el decremento anual del anillo (Tardif and Stevenson, 2001), como se muestra en la Figura 24.

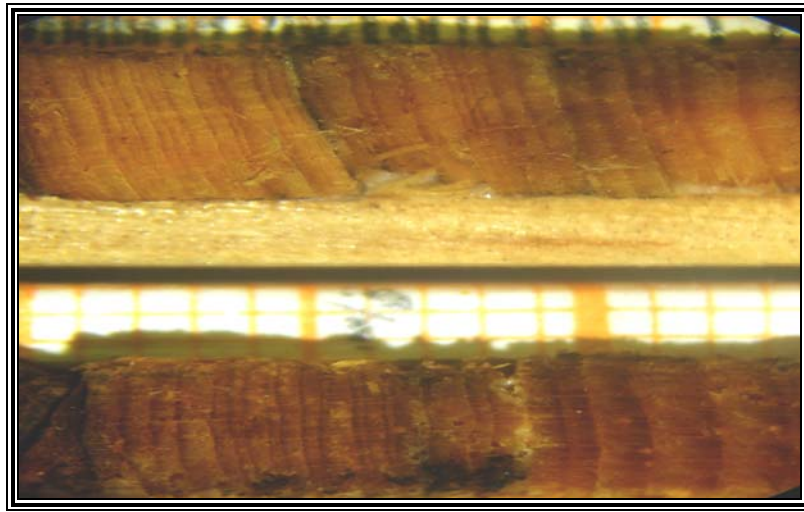


Figura 24.- Par de núcleos A y B, mostrando anillos muy estrechos por posible estrés hídrico.

Laboratorio de Contaminación Atmosférica; Foto: Alma R. Cruz Muñoz

10.3 Variables climáticas (precipitación y temperatura) de la Zona de Paso de Cortés

Las variables precipitación (pp) y temperatura (T°) son determinantes, ya que de éstas depende los óptimos recursos para el crecimiento anual de los anillos de *P. hartwegii*. Dichas variables meteorológicas fueron tomadas la estación de San Luis Ameca, ubicada a $19^{\circ} 11' LN$ y $98^{\circ} 58' LW$, a una altitud de 2800 msnm. La variable pp, fue graficada tal como se reportó en los datos originales, pero la T° fue modificada debido a la diferencia de altitud, entre la estación y el sitio de muestreo, por lo cual, se restaron $0.65^{\circ} C$ por cada 100 m de altitud (García, 1973).

El registro consta de 44 años, de 1961 hasta el año 2005 (Figura 25). Se determinaron oscilaciones en ambas variables, a lo largo del periodo citado. Un periodo anómalo de comportamiento se determino para 1978-1991, ya que el patrón que se había presentado de 1961 a 1976 mostró oscilaciones constantes en proporciones similares de pp y T° , sin embargo a partir de 1977 se observa un aumento notable de la T° ,

alcanzando su valor más alto en 1982 de 13.46 °C, registro que coincide con el valor más pequeño de la pp, siendo de 498 mm.

De tal forma que de 1978 a 1991, aumento de T° y por lo tanto la humedad aminoró en la atmósfera, al no haber partículas de agua que atraparan la energía calorífica, precipitación pluvial en el bosque de pino fue insuficiente. Este fenómeno coincide con los años en los que se observaron la menor amplitud en grosor de los anillos de crecimiento de *P. hartwegii* correspondientes a los años 1978, 1979 y 1980.

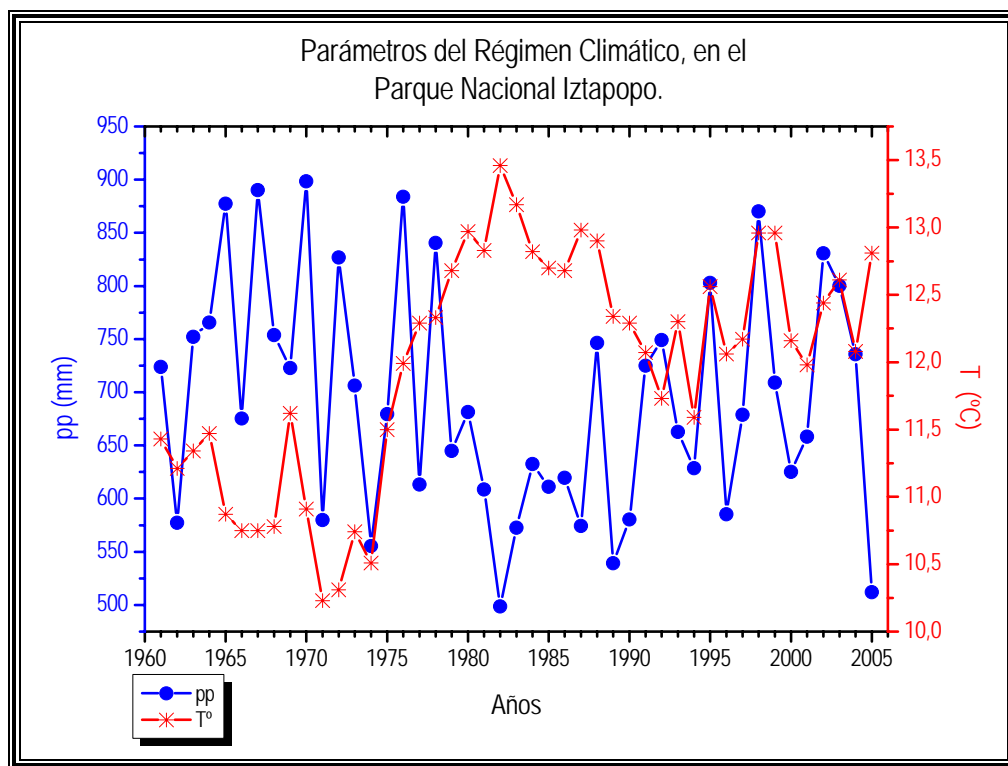


Figura 25. - Oscilaciones Anuales de la pp total y la T° media correspondientes a la estación Meteorológica de San Luis Ameca en el periodo 1961-2005.

Si el registro de los datos fuera seccionado en tres periodos de fácil diferenciación visual de aproximadamente 14 años cada uno, se aprecia un fenómeno interesante de repetición de oscilaciones o periodicidad; el primer periodo, de 1963-1976, la correspondencia de ambas variables se mantiene uniforme, donde la pp es mayor que la T°; posteriormente, del año 1977-1991, la pp decrecentó drásticamente,

mientras que la T° en correspondencia asciende en una proporción de cerca del 20%. El tercer periodo de 1992-2004 también se diferencia de los 2 anteriores; y el dato que cabe resaltar es que en el año 2005 el ascenso de la T° es visiblemente mayor que la cantidad de pp, y posiblemente el patrón del segundo periodo se repetirá.

Por otra parte, es inminente el aumento paulatino de la T° , ya que aún cuando la periodicidad de ambas variables es notoria, para el caso de la T° del tercer periodo, los valores se elevan ligeramente en un 8% (1.23 °C) con respecto a los valores presentados para el primer periodo. Este comportamiento de la variable T° no es sorprendente, ya que debido a las actividades antropogénicas se han generado cantidades extremas de gases de invernadero que promueven el calentamiento de la superficie a nivel global

10.3.1 Diferenciación de los Periodos de pp y T° .

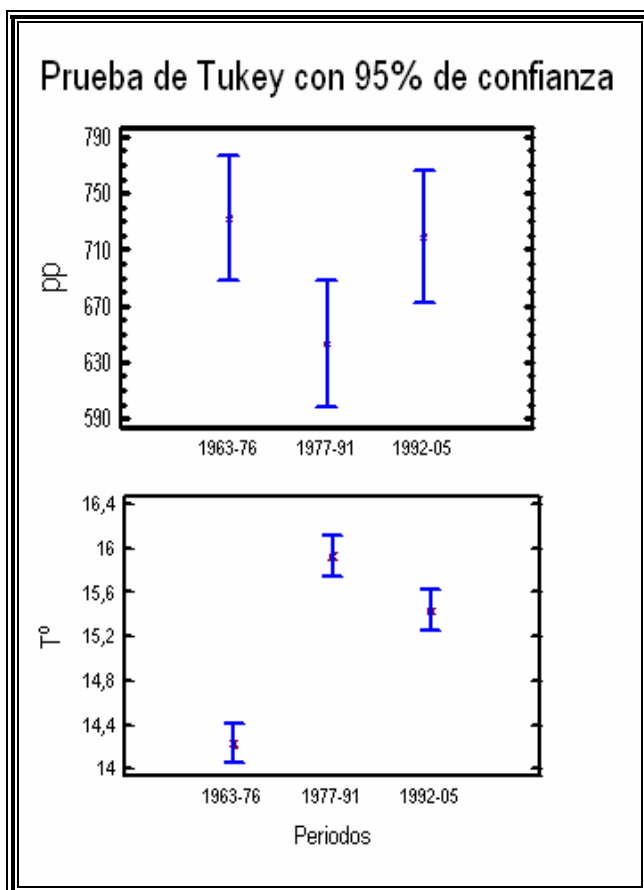


Figura 26.- Comparación de medias entre 3 periodos de tiempo para la pp y T° del Paso de Cortés.

Ahora bien, para confirmar la existencia de los periodos deducidos en la variables climáticas (pp y T°), se aplicó una prueba estadística de la diferencia significativa de media de su desviación estándar, con un intervalo de confianza (IC) del 95% (figura 22), ya de ello se ha derivado la supresión del crecimiento de los anillos de crecimiento. De manera general, en la pp el periodo uno y tres son muy semejantes, sin embargo, el segundo periodo difiere mostrando un rango de medias más pequeñas que oscila entre los valores 600-680.

En este sentido, cabe señalar que es posible que esta distribución pertenezca a un fenómeno de periodicidad para la pp, que consta de un ciclo de 14 años aproximadamente. Sin embargo, la amplitud del IC sugiere incrementar el número de las muestras (n).

Para la T° el fenómeno de periodicidad no se presenta. Si observamos el rango de distribución de medias para el periodo 1963-1976, es más pequeño con respecto a los siguientes dos periodos. De 1977-1991 los límites del intervalo muestran su mayor valor, encontrándose entre 12.29-12.07; para el último periodo, si existiera el patrón de ciclo que se presentó para la pp, éste sería muy similar al primer periodo, sin embargo, como aparece en la Figura 26, la tendencia al aumento es claramente definida.

10.3.2. Influencia de la pp y la T° en el Crecimiento Anual Estacional de *P. hartwegii*.

De acuerdo con lo postulado por Cook (1977), el crecimiento radial de las coníferas, está influenciado primeramente por la disponibilidad hídrica del sustrato en el que se desarrollan. Para este estudio, se asociaron las variables pp y T° con respecto al crecimiento de primavera y verano así como el tiempo (año) en que se formaron.

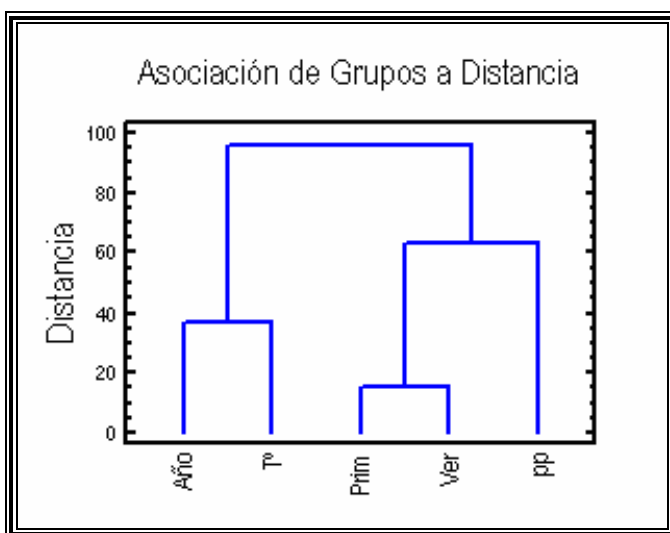


Figura 27.- Dendrograma entre el crecimiento radial y las variables climáticas en el periodo 1961-2005

En términos generales, en la Figura 27 puede observarse que a lo largo de los 44 años de registro, el crecimiento de primavera se encuentra más íntimamente ligado al crecimiento de verano; mientras que el año de formación del anillo fue más cercano con la variable T°.

De manera secundaria la pp es la variable que determina el crecimiento radial, y por último, el vínculo que asocia los grupos anteriores.

A pesar de esto, es necesario conocer el comportamiento del crecimiento radial con respecto a las variables climáticas para cada periodo establecido. De esta forma en la Figura 28 que corresponde al periodo 1963-1976 se observa que los crecimientos estacionales son muy cercanos y están condicionados a la T° y en segundo término a la pp, el tiempo en este caso no es un factor completamente determinante.

Solo en este periodo 1963-1976, puede aplicarse el criterio de que la T° en la estación de crecimiento de *P. hartwegii* dirige la proporción del crecimiento neto anual (Linderholm, 2001).

Para el caso del segundo periodo, de 1977-1990, el año de formación del anillo se vincula de forma muy cercana al crecimiento de verano, y a su vez, los 3 anteriores se ligan con la T° predominantemente alta en ese periodo generado por la escasez de pp, variable que se encuentra más alejada del dendrograma.

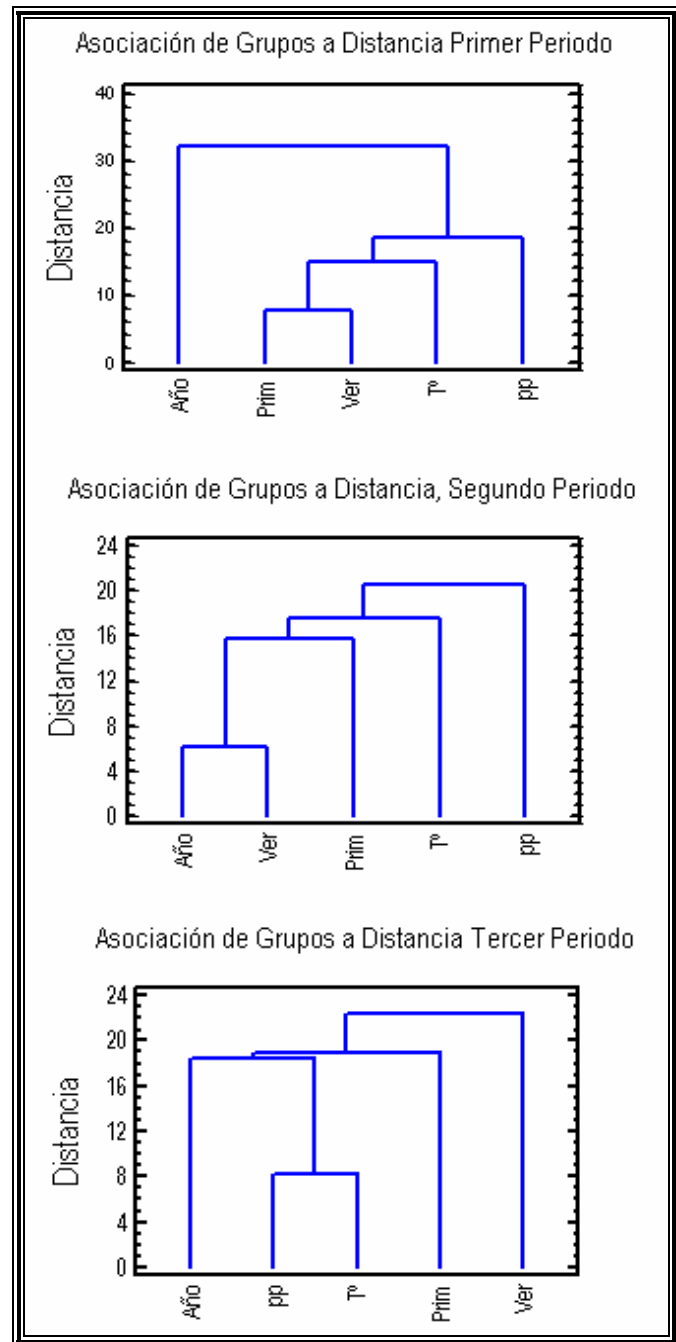


Figura 28. - Dendrograma entre el crecimiento estacional y las variables climáticas de los 3 periodos

Este inusual comportamiento de la T°, influencia la presencia de pp para el último periodo comprendido de 1992-2005. Como se observa en el diagrama (Fig. 24) las variables climáticas están fuertemente enlazadas, y puede deberse a que la ligera disminución de la T° permitió que el microclima en el bosque generara diferentes formas de pp (niebla y rocío).

El año establece un vínculo con los anteriores, mientras que los crecimientos estacionales primavera-verano se incorporan a este grupo sin establecer relación directa con las variables climáticas.

10.3.3. Oscilaciones de pp y T° promedio Mensual del Paso de Cortés durante Tres Periodos.

* **Precipitación.**- De manera general, en la gráfica de la Figura 25 se muestran las oscilaciones medias mensuales de la pp y la T° para los periodos de tiempo antes establecidos. De tal forma que en todos los periodos, los meses en los que se registra mayor pp son junio, julio, agosto y septiembre, descendiendo drásticamente para los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, que corresponden al periodo seco, donde se presenta mayor número de días despejados son que permita la pp en cualquiera de sus modalidades.

Según Anaya et al (1980) en un estudio ecológico realizado en el Parque Nacional Iztapopo, la mayor cantidad de agua captada hasta el año 1979 proviene directamente de la lluvia y el rocío, que es más abundante en junio, julio y agosto, alcanzando máximos valores para julio. Las mínimas pp fueron registradas de diciembre a marzo correspondientes a los días más despejados con ocurrentes tempestades eléctricas.

Cabe destacar que para este estudio la distribución mensual de la pp es muy similar para el periodo 1963-1976 y 1977-1991 contrastando con el análisis de Anaya et al (1980), mientras que las oscilaciones difieren ligeramente para el último periodo comprendido de 1992-2005. La pp máxima en el periodo 1, de 1963-1976, fue de 152.5

mm en el mes de agosto, mientras que para el periodo 2, de 1977-1991, la pp máxima fue de 124 mm ocurrida en julio y finalmente para el tercer periodo, de 1992-2005, el valor fue de 125 mm en julio (Anexo 1).

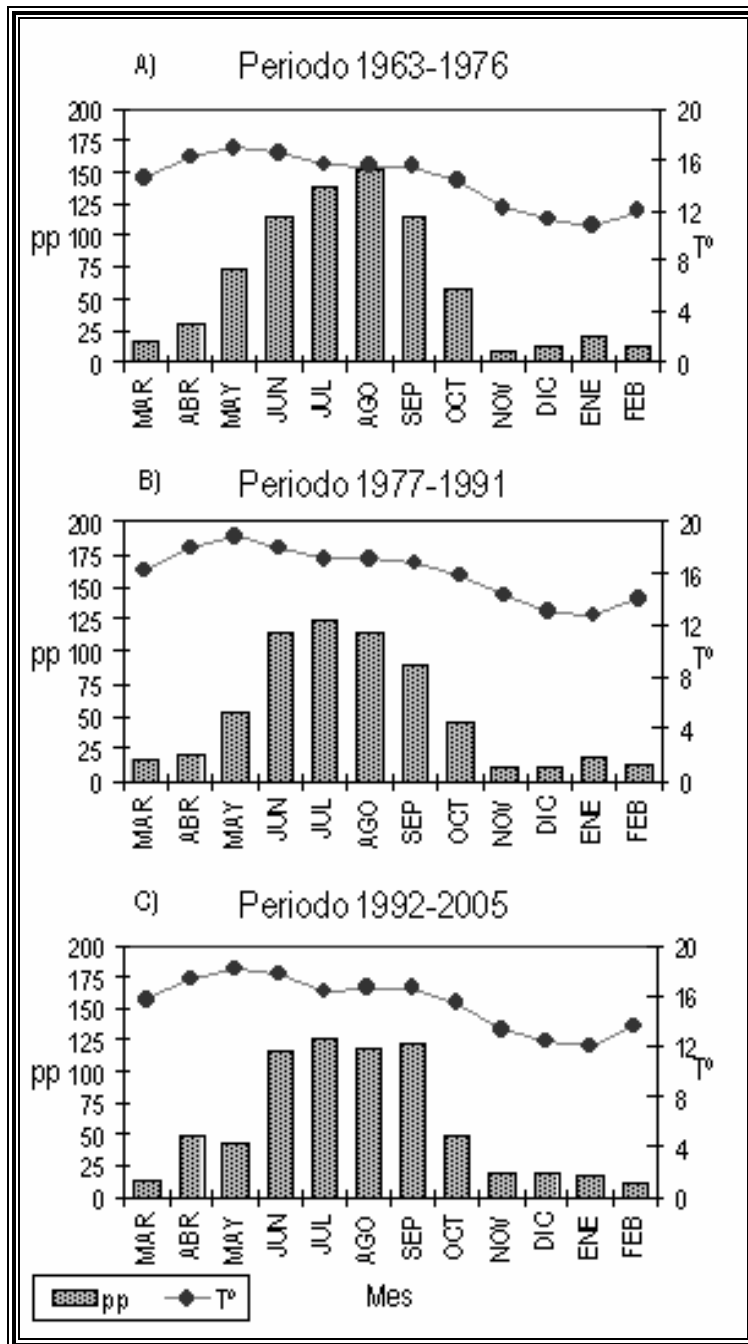


Figura 29.- Presentación de las variables pp y T° media mensual, durante tres periodos, en el Paso de Cortés.

Las pp mínimas para 1 y 2 se presentaron en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, siendo en noviembre la mínima con 9.5 para el periodo 1 y 11.3 para el periodo 2. Mientras que para el tercer periodo los meses de enero, febrero y marzo se distinguen por este descenso de la pp, siendo en febrero la mínima con 12.4 mm.

Aparentemente las oscilaciones mensuales de la pp se han modificado en un periodo de 30 años aproximadamente, y con una tendencia al decremento del recurso de cerca del 20%.

Mientras que la proporción de la pp en el periodo 1 y 2 es similar en sus oscilaciones, y contrasta con lo reportado por Anaya *et al* (1980), quien registró las máximas pp en los meses junio, julio, agosto y septiembre; pero en el periodo 3 se muestra

un registro muy heterogéneo e inusual de la pp.

* **Temperatura.**- Por otro lado, no se puede aislar el fenómeno de la pp, ya que guarda una estrecha relación con la T°, en el sentido de que la presencia de ambas determina la disponibilidad de humedad en el aire. En primera instancia, cabe destacar que la curva de T° mensual de los 3 periodos se comporta casi de forma idéntica, distinguiendo las T° máximas y mínimas en mayo y enero respectivamente para todos los periodos.

Aunque no se observan oscilaciones claramente definidas puede distinguirse que los meses de abril, mayo y junio presentan las máximas temperaturas. En mayo del primer periodo, de 1963-1976, se registró 13.65°C, elevándose 1°C para el siguiente periodo y manteniéndose en 14.15°C para el tercer periodo. Mientras que las mínimas se presentaron en diciembre, enero y febrero. En enero del primer periodo, la temperatura fue 10.76°C, en el segundo periodo 12.76°C y en el último periodo se registró 12.09°C.

En la Figura 25 se identificó el notorio aumento anual de la temperatura, ahora que se ha presentado de forma mensual en intervalos de tiempo de 15 años se puede mencionar que existe un aumento del 9% de la temperatura del periodo 2 con respecto al periodo 1.

Este comportamiento de la temperatura obedece al patrón establecido por Anaya *et al* (1980) en tres zonas del Parque Nacional Iztapopo. A diferencia de la pp, donde se observan datos dispersos para el tercer periodo, la T° no cambia su patrón excepto por el aumento del valor en sí. Sin embargo, debido a la relación pp-T° sería lógico pensar que ambas son codependientes y que la presencia de una de estas variables está influenciada por la otra.

A pesar que la zona de muestreo se ubica en altitudes considerables (3600-3800 msnm), donde la T° debería de ser menor y la pp debería presentarse en mayores

escalas, es muy importante considerar el marcado efecto del cambio de la T° en la atmósfera a tal grado de afectar este tipo de ecosistemas.

10.4 Crecimiento de Primavera y Verano de *Pinus hartwegii* en el periodo 1956-2004.

Ya se discutió la importancia de la pp y T° en el crecimiento anual, del cual, la mayor proporción corresponde a la madera del crecimiento de primavera (madera temprana), posee células más grandes con respecto al crecimiento de verano. La madera de pino varía en peso, en función del mayor o menor contenido de agua en su interior, es decir, la humedad. Cuando la humedad aumenta, la madera se hincha y cuando disminuye, la madera se contrae y reduce su volumen (Dans et. al. 1999).

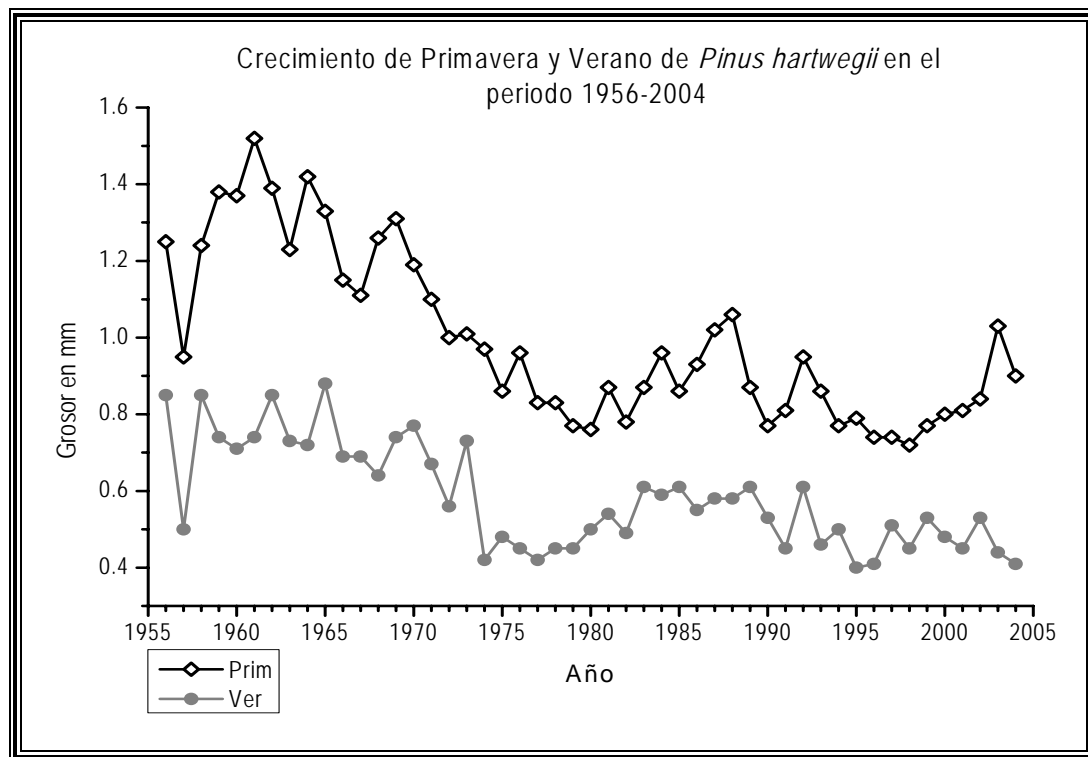


Figura 30.- Representación del Crecimiento de Primavera y Verano de *Pinus hartwegii* del Paso de Cortés en el periodo 1956-2004

En la Figura 26 se muestra el crecimiento anual desplegado en forma de crecimiento de primavera y verano. A lo largo de la gráfica se puede observar la

proporción en tamaños de cada crecimiento estacional. De manera que en la madera temprana es más notoria esta supresión del crecimiento, ya que de acuerdo con su máximo valor alcanzado en 1961 con 1.52 mm se nota una pérdida de casi 0.8 mm con respecto al año de menor crecimiento en 1998 con 0.72 mm.

A diferencia de la madera tardía, donde la relación de pérdida de crecimiento es de 0.48 mm entre su máximo registro en 1957 de 0.9 mm y su mínimo en 1974 y 1977 con 0.42 mm. Las oscilaciones de la madera temprana descienden paulatinamente, observando los picos más representativos en los años 1964, 1967, 1972, 1975, 1990 y 1998. Ahora bien, si tomamos en cuenta la cantidad de pp (Figura 26), que se presentó un año anterior a los menores valores de crecimiento de primavera, tenemos que corresponden a las menores pp registradas en 1971 (579 mm), 1974 (555 mm), 1989 (539 mm) y 1997 (678 mm).

Resulta interesante señalar que las oscilaciones del decremento de la madera tardía no responde de igual forma a la pp como lo hace la madera temprana y que no se encuentra en una proporción distribuida homogéneamente, es decir, la madera tardía no necesariamente se incrementa cuando la madera temprana sí, ni decrementa aún cuando la madera temprana también lo hace.

Si el decremento de la madera temprana está directamente relacionado con el descenso de la pp, entonces el incremento de esta madera se presentaría cuanto más altas sean las pp del año anterior del crecimiento. Sin embargo para el caso de *P. hartwegii* del Paso de Cortés, esta correspondencia no se lleva a cabo.

Los máximos picos del crecimiento de primavera se encuentran en 1961, 1964, 1969, 1976, 1988 y 2003, donde las pp correspondientes al año anterior no fueron precisamente las más altas, pero curiosamente si lo fueron para los años antes señalados.

En el caso del decremento de la madera temprana, la variable T° presentó valores muy dispersos, y a excepción del segundo periodo (1977-1991), donde la correspondencia "a mayor T° , menor pp se hace evidente, solo para el menor crecimiento del año 1972, la menor T° coincide presentándose en 1971 el menor valor a lo largo del registro.

Para las mayores dimensiones del crecimiento de primavera, la T° parece no estar relacionada directamente ya que sus valores van de 14°C (1968) hasta 16.2°C (1987), que es un intervalo de cambio considerable si recordamos que el valor mínimo de la T° es de 10.25°C y el máximo de 13.45°C .

Por lo tanto, la relación del crecimiento de primavera con respecto a la pp se hace evidente, si consideramos que el crecimiento se lleva a cabo desde la primavera hasta mediados del verano, donde la fotosíntesis se produce con mayor intensidad en este periodo generando alimento en forma de azúcares, de tal forma que cuando llega el verano (elevándose las T°), estos azúcares se trasladan gradualmente a partes leñosas y raíces, para almacenarlos durante el periodo de dormancia y poder aprovecharlos cuando llega la primavera en forma de crecimiento.

10.5 Análisis Elemental de los Anillos PIXE.

10.5.1 Macroelementos y Microelementos en los Anillos de crecimiento de *Pinus hartwegii*.

Con la clasificación de Pais (1997) ubique al Ca y K como macroelementos, mientras que el Cu, Fe, Mn y Zn están dentro de los microelementos. A continuación se describen las concentraciones detectadas con PIXE en muestras pretratadas y no pretratadas correspondientes a los primeros 30 anillos (de la corteza a la médula) del *P. hartwegii*.

⇒ **Calcio.**- El Ca, es un elemento esencial en el crecimiento del árbol, se incorpora en forma de ión Ca^{2+} en solución (Jones, 1998). Su función es la formar parte en: la cementación de paredes celulares, en la permeabilidad de la membrana; activa varios sistemas enzimáticos que controlan el crecimiento de la planta y claro está, corrige problemas de acidez en el suelo.

En la Figura 31-A) se observa el registro de Ca en ppm de ambas muestras, pretratadas y no pretratadas. En las primeras, las concentraciones van de 39 000 a 55 000 ppm correspondiendo al intervalo que va 1974 a 1992, la concentración de Ca varía en unidades de 15 000 ppm entre ambas muestras, mientras que de 1993 a 2004 la diferencia no es tan amplia, sin embargo las oscilaciones de la muestra pretratada se mantiene de forma constante, mientras que en la no tratada se incrementó de forma súbita en 1991.

De acuerdo a lo reportado por Watmough, Fischer y colaboradores (2002), la disminución en la concentración de Ca y Mg en anillos de crecimiento, está directamente asociada con el grado de decline del bosque y en consecuencia con la disminución en el grosor de los anillos. Aunque la concentración de Ca en las muestras pretratadas muestra oscilaciones constantes, la disminución en el grosor de los anillos en relación directa con la presencia de Ca y K estos elementos en sus anillos.

⇒ **Hierro.**- la incorporación de Fe en la planta, depende directamente de la forma soluble en el suelo. Interviene en las reacciones de oxidación-reducción por su capacidad para intercambiar electrones, y en un constituyente esencial de varias enzimas. Influye en la síntesis de la clorofila en el resto de compuestos que intervienen en la fotosíntesis, respiración y metabolismo.

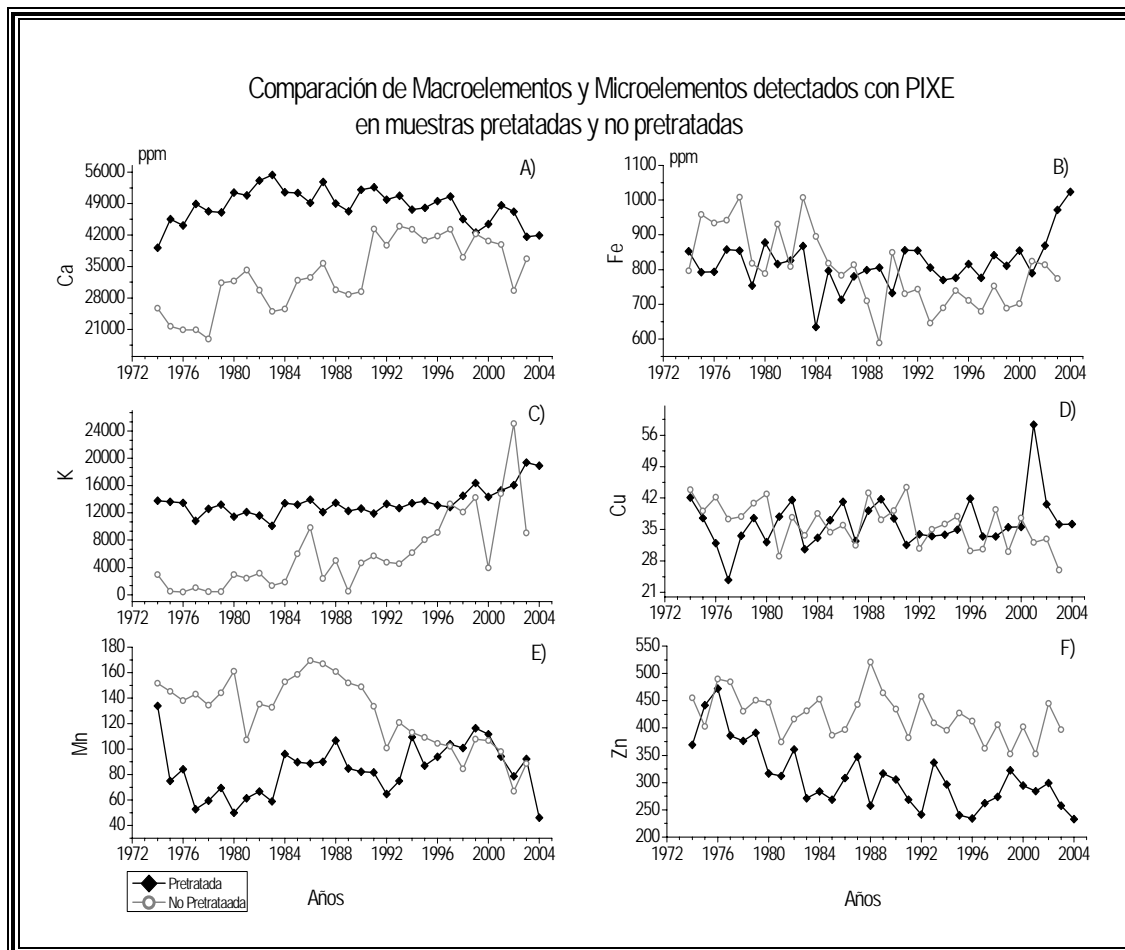


Figura 31.- Concentración de Macroelementos y Microelementos en ppm detectados con PIXE en muestras pretratadas y no pretratadas de *Pins hartwegii*.

La concentración de Fe en ambas tipos de muestras, fue similar en las oscilaciones, que van de 600 ppm a 1000 ppm. En las no pretratadas, se presentan dos disparos de concentración elevado y de descenso de la misma en 1983 y 1989 respectivamente, mostrando oscilaciones inconstantes (Figura 31-B). Mientras que en el registro de las muestras pretratadas, el disparo de descenso súbito se presentó en 1984 y el ascenso de la concentración de Fe notoria se observa a partir del 2002.

El aumento de Fe en el floema vivo está relacionado con el aumento en las emisiones de SO₂ (Baes III, 1984). Para el caso de las muestras pretratadas, el aumento notable se nota a partir del año 2000, precisamente donde el aumento de SO₂ es evidente, sin embargo, las mayores emisiones fueron registradas de 1988 a 1991 (Figura 33; Pág. 72).

⇒ **Potasio.**- El K es el tercer elemento que las plantas necesitan en mayor cantidad, en forma de sales o combinado con otros elementos. La importancia del K en plantas, en forma de ión K⁺, radica en el mantener la turgencia de las células vía la ósmosis; también participa en la apertura y cierre de los estomas y contribuye en el aumento de tamaño de la célula, por lo cual debería estar en correspondencia con el crecimiento radial del *P. hartwegii*.

Aunque en las muestras pretratadas, durante 1974 a 2001, las oscilaciones de K se presentaron valores homogéneos de 10 000 a 14 000 ppm, las fluctuaciones en el crecimiento radial oscilaron entre 1.2 mm a 1.6 mm (Figura 21), contrario a lo registrado 1955 a 1975 con 2.3 a 1.6 mm. En el caso de las muestras no pretratadas, la concentración de K que se registró fue relativamente pobre, ya que del año 1974 a 1984, los valores van de 387 ppm a 3 160 ppm; sin embargo, de 1996 a 2004 se aprecia un decremento considerable con un pico de descenso y otro de ascenso muy irregulares en el año 2000 y 2002 respectivamente (Figura 31-C).

De acuerdo con lo reportado por Hernández (2007), la presencia K en anillos de oyamel del Parque Nacional Zoquiapan, es directamente proporcional con el aumento en el grosor del mismo; no así para pino de la misma zona que mostró concentraciones menores a las propuestas por Reinmann (1998), atribuidas a la actividad volcánica y lavado del elemento; por lo que estos resultados son consistentes con lo reportado en el presente estudio.

⇒ **Cobre.**- El Cu es absorbido por las plantas de forma pasiva y fácilmente tomado cuando se encuentra disuelto. En la Figura 31-D), se aprecia una concentración constante

de Cu en las muestras pretratadas, que van de 30-43 ppm, excepto para el año 2001, donde su concentración supera las 55 ppm. El Cu guarda una relación antagónica con el Fe y fue registrado en el año 2001, donde a medida que aumenta el Fe decrece el Cu.

Mientras que para la madera que no fue pretratada, se nota una fluctuación muy similar con la otra muestra, tanto en picos como en concentración de Cu, a excepción del 2001; desde el año 2002 se nota el decremento que coincide con el aumento de la concentración de Fe, asociado al incremento de SO₂ en el ambiente como ya fue descrito anteriormente.

⇒ **Manganeso.**- El Mn es absorbido por las plantas cuando se presenta en forma soluble en el suelo, está relacionado con el proceso de la fotosíntesis; a lo largo del registro para las muestras pretratadas, se notan oscilaciones de concentración irregulares, la mayor fue de 134 ppm en el año 1974, seguida por 116 ppm en el año 1999. Estas cantidades corresponden para los mismos años con los menores valores de Ca, y la relación que existe entre ambos elementos es que en presencia de grandes concentraciones de Mn, se suprime la incorporación de Ca en el árbol.

Las muestras pretratadas mostraron una concentración más alta que las no pretratadas; pero desde 1995 a 1991, la diferencia en la concentración entre ellas es de 85 ppm en promedio. De cualquier modo, desde 1998 a 2003, el patrón de la presencia de Mn en anillos de *P. hartwegii* es prácticamente el mismo en ambas muestras, y en cuanto a la concentración, desde 1993, se pueden empatar las líneas de dichas muestras (Figura 31-E).

Es posible que el incremento de Mn esté relacionado con el aumento de Al y decremento del pH del suelo. Según Augustin y colaboradores (2005), en un estudio químico de abeto escoses, detectaron un decremento de Mn a partir de 1970, comportamiento similar al que aquí se presenta. Además, durante la transición de sapwood (madera suave) a heartwood (madera dura, se mantiene una actividad intensa en la movilidad de los elementos, que decrecienta al aumentar la edad del árbol; sin

embargo este criterio no se aplica a las muestras pretratadas donde la presencia de Mn, tiende al aumento en años más recientes.

⇒ **Zinc.**- La entrada del Zn en la planta se puede llevar a cabo de forma pasiva y/o activa, la presencia de este elemento se comporta directamente con la concentración de los nutrientes en solución en el suelo, por lo tanto, la pp determina la absorción del Zn como se observó en 1976 a través de las muestras pretratadas (Figura 31-F) y su máxima concentración (472 ppm) coincide con el máximo valor de pp, de tal forma que el Zn decreciente a partir de la disminución del factor lluvia.

La diferencia de concentración de Zn es en promedio de 120 ppm, siendo mayor para las muestras no pretratadas, sin embargo la eficiencia de PIXE es muy clara en el caso del Zn, ya que el patrón de las fluctuaciones es muy similar para las 2 muestras.

Como fue reportado desde 1976 por Barnes y colaboradores, el Zn es un producto de actividades antropogénicas, relacionadas con la combustión de gasolinas, y en un análisis químico realizado en anillos y corteza de una especie de pino, observaron que el Zn se encontraba en concentraciones más elevadas conforme a su cercanía con la carretera.

10.5.2 Elementos Traza presentes en los Anillos de *Pinus hartwegii*.

⇒ **Plomo.**- Aunque el Pb no es un elemento esencial en las plantas, es absorbido en cantidades extremadamente pequeñas y está limitada cuando la T° del suelo es muy baja. El Pb por excelencia ha sido el metal pesado más representativo para evaluar la contaminación de origen antropogénica, acumulado en distintas superficies.

En las muestras pretratadas, el intervalo de la concentración de Pb va de algunas décimas hasta 6 ppm (Figura 32-A). Para el periodo 1974 a 1984, las oscilaciones del elemento se mantuvieron homogéneas y puede atribuirse a que aún no se legislaba para

moderar la cantidad de Pb en gasolinas en el Distrito Federal. Para el periodo 1989 a 1995 se observa un notable decremento que coincide con lo publicado por el INE sobre un 36% de disminución de emisión de Pb por el uso de gasolinas que disminuyó en un 60% la concentración de Pb en su fórmula.

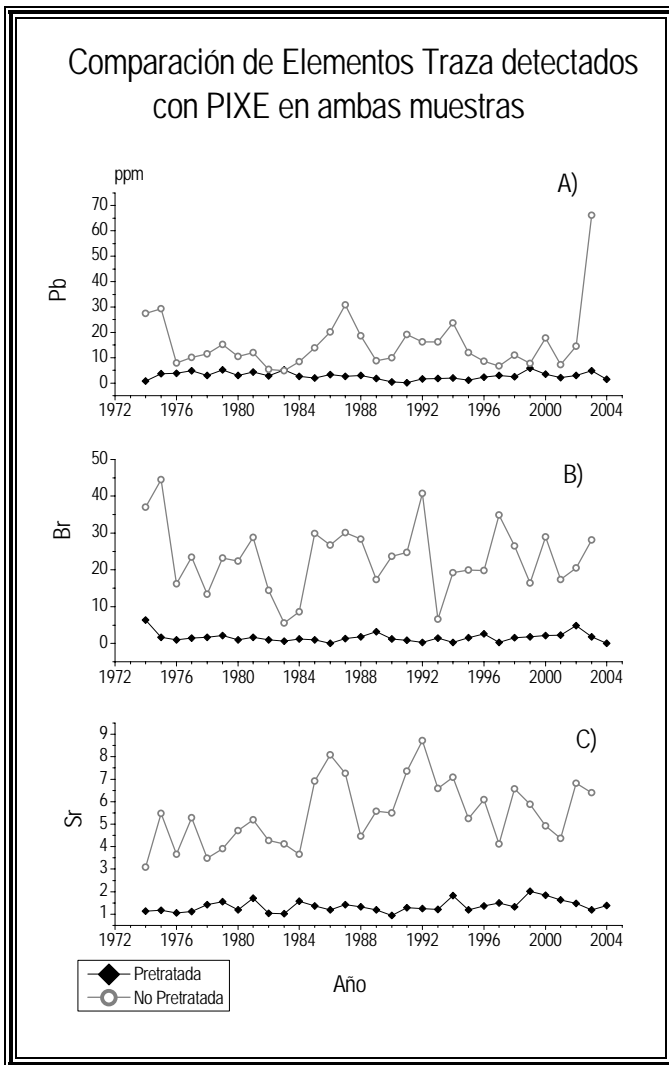


Figura 32.- Concentración de Elementos Traza en ppm detectados con PIXE en muestras pretratadas y no pretratadas.

La diferencia de las concentraciones de este elemento, entre las muestras pretratadas y no pretratadas es notoria, sobre todo para las últimas en 1987 con 30.8 ppm y en 2003 con 66 ppm. Estos valores compararse con las concentraciones de Pb encontrado cenizas de raíces y granos de vegetales desarrollándose en áreas cercanas a zonas industriales, con valores de 2.7 a 94 ppm (Kábata-Pendias, 1992).

De acuerdo con Fischer y colaboradores (2002), la cantidad de Pb detectado por espectroscopia atómica en anillos de *Fagus grandifolia*, fue mayor en altitudes superiores, por efecto del transporte de contaminantes por acción de los vientos con dirección noroeste-suroeste y al aumento de la depositación en la superficie terrestre que aumenta la

disponibilidad de Pb soluble. Por lo que la concentración de este elemento debía estar relacionado con la mayor emisión de contaminantes. Al acudir a la Figura 33 (Pág. 72) de contaminantes se puede observar que este comportamiento es consiste conforme al aumento de SO₂, CO y NO₂.

⇒ **Bromo.**- Aunque se ha evidenciado Br en tejidos de varias plantas, no se sabe si es esencial para su crecimiento. La cantidad de Br encontrado en muestras pretratadas van de 0.17 ppm la mínima concentración y de 6.35 ppm la máxima, cantidades muy similares encontradas en legumbres que fueron de 2.1 a 6.4 ppm.

Mientras que para las muestras no pretratadas, las concentraciones son mayores y con oscilaciones dispersas muy amplias, donde la menor concentración de Br es 5.5 ppm, y la mayor es 44.5 ppm.

Otro hecho interesante es que (Yamada, 1968), registró cantidades muy elevadas de Br en plantas creciendo en suelos que soportaron descargas considerables de ceniza volcánica; en relación a esto, los núcleos de *P. hartwegii* pretratados, los registros en 1994 y 2002, no son evidentes. Ahora bien, para las muestras no pretratadas, no se observa un aumento considerable para tales fechas, sino hasta 1997 (Figura 32-B).

Los resultados que se presentan en esta investigación son consistentes con lo reportado por Oliveira (1996), donde las concentraciones de Br no presentan diferencias notables a lo largo de los primeros 22 anillos de *Pinus elliottii*.

⇒ **Estroncio.**- La presencia de Sr en plantas es muy heterogéneo. Por una parte las concentraciones de Sr reportadas para diferentes especies vegetales van de 1 a 1000 ppm. En las muestras pretratadas, encontramos de 0.9 ppm en 1990, hasta 2 ppm en 1999. Por otra parte, el Sr compite fuertemente con el Ca para incorporarse en la planta, pero a pesar de ello el Sr nunca sustituirá al Ca en las funciones bioquímicas. Al analizar las gráficas de concentración de Sr y Ca, evidentemente hay una supresión de Sr a medida que el Ca aumenta para el año 1990 y un aumento de Sr justo en el año donde el Ca mostró su mínima concentración.

Una vez más en la Figura 32-C se observa que para el caso de este elemento en muestras no pretratadas, la concentración es en promedio 4 veces mayor que en las

pretratadas, desde 3 a 8.7 ppm. El patrón de registro de las oscilaciones de Sr en las muestras no pretratadas no sigue el comportamiento en cuanto a la relación Sr-Ca.

10.5.3 Otros Elementos detectados con PIXE en ambas muestras.

10.5.3.1 No Pretratadas.

⇒ **Níquel.**- La incorporación de Ni va en aumento mientras más bajo sea el pH del suelo y se incrementa su disponibilidad cuando el pH es menor a 6.5 (Farago, 1994). Los valores de concentración oscilan en 3.8 ppm (mínimo) y 39.5 ppm (máximo), reporta un intervalo de 1 a mg/kg de Ni en plantas, mientras que para Reinmann los límites de 8-122 ppm son permisibles para la corteza; y para Kábata-Pendias (1992) en vegetales los límites 0.2 a 3.7 ppm son aceptables.

De acuerdo a las oscilaciones en la concentración de este elemento para las muestras no pretratadas (Figura 33-B), hay un pico de incremento destacable prácticamente en la mitad del registro, que contrasta con lo mencionado por Sheppard y Witten (2005), quienes realizaron la cuantificación de Ni en *Pinus ponderosa* en relación con la presencia de CO₂, donde no encontró un patrón de correspondencia equitativa entre ambas variables. En la presente investigación, esta referencia solo es consistente para el año 1988.

⇒ **Vanadio.**- Aunque se ha demostrado que el V es un elemento biológicamente activo, ya que influye en gran medida, en la actividad enzimática del suelo, también interviene en la mineralización y por ende en la nutrición de la planta. El V en concentraciones superiores de 100 mg/Kg puede estar relacionado con el depósito por la contaminación del aire. Los valores de concentración oscilan entre 4.6 ppm para la mínima y 43.6 pp para la máxima (Figura 33-D).

⇒ **Titanio.**- Para este elemento las oscilaciones en la concentración fueron muy dispersas, sin embargo el pico de descenso drástico se ubica en el año 1987, con 1333 ppm y la máxima concentración en 1982 con 3936 ppm, (Figura 33-F), concentraciones que son estratosféricas con lo reportado anteriormente por País et al (1997), ya que en concentraciones mayores de 200 mg/Kg que se encuentren en tejidos de plantas se considera muy tóxico, ya que el Ti es un metal considerado fisiológicamente inactivo en plantas.

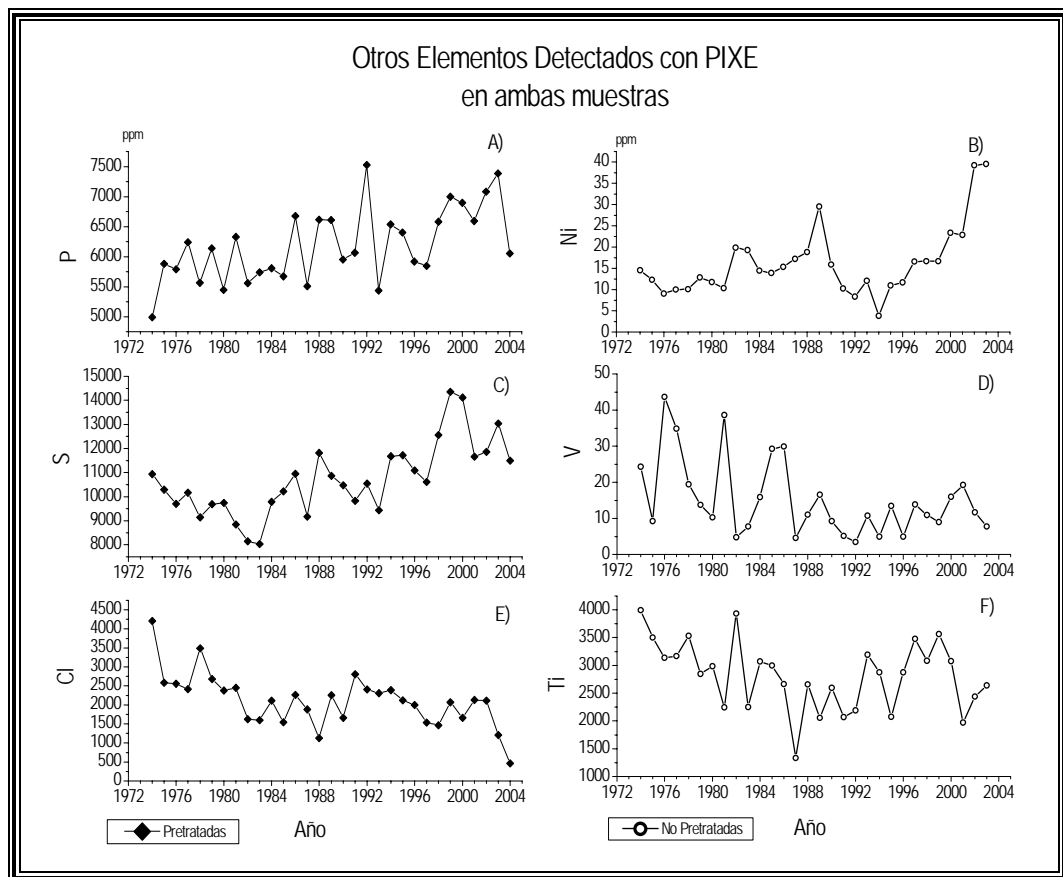


Figura 33.- Otros elementos detectados con PIXE que no fueron encontrados simultáneamente en ambas muestras

10.5.3.2 Pretratadas.

⇒ **Fósforo.**- El P es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, es irremplazable. El P se incorpora a la planta por vía radicular en forma de ortofosfato. Es

muy importante por que forma parte de la estructura del ATP y en su síntesis. El adecuado suplemento de P es esencial para el desarrollo de nuevas células. Con tales funciones es natural que la presencia de este elemento corresponda con el crecimiento radial (Figura 33-A).

El registro de la concentración de P, indica que las más altas concentraciones se encuentran en anillos recientes, ya que el aumento de este elementos se presenta más frecuentemente en el albura (sapwood) que en el duramen (heartwood) (Cheng y colaboradores, 2007) y el aumento de P está directamente relacionado con la presencia de anillos más estrechos, si acudimos a la Figura 21 de las anchuras, se corrobora que los picos de descenso coinciden con el aumento de P.

⇒ **Azufre.**- El S es absorbido principalmente como anión sulfato o bien se incorpora a través de las hojas en forma de SO_2 presente en el aire. El S ayuda a desarrollar enzimas y vitaminas, así como la producción de semillas. El S nativo o libre, se encuentra principalmente en depósitos volcánicos sedimentarios, de tal forma que cuando se presente una erupción volcánica, puede ocurrir desde emisión de grandes cantidades de partículas, gases, roca líquida o lava.

El Volcán Popocatepetl se encuentra en dirección sur de nuestra zona de muestreo, a partir de 1994 hasta hoy día, ha presentado actividad volcánica que incluye emisiones de material piroclástico, lava, gases cargados densamente de SO_2 , HCl, HF, CO_2 y H_2S , así como cenizas.

De acuerdo con el National Museum Smithsoniano y el CENAPRED, los años representativos de actividad volcánica son 1994, 1996 y 2000; de acuerdo con el monitoreo, se reportan varias toneladas de SO_2 por día, sin embargo, al observar la Figura 33-C de concentración de S, la mayor concentración se hace más evidente para el año 2000, donde aumenta hasta en más de 2000 ppm con respecto a la máxima concentración registrada en años posteriores.

⇒ **Cloro.**- El Cl es absorbido por las plantas en forma de ión Cl^- pasivamente por las raíces. El Cl también puede absorberse por las hojas desde fuentes aéreas, este elemento es considerado esencial para el crecimiento de las plantas. Interviene en las funciones de regulación de los procesos de ósmosis, desarrollo de la planta y supresión de enfermedades.

La presencia del Cl en la planta, aún cuando ésta sufra estrés hídrico mostrará respuestas benéficas. Para los años de actividad volcánica, no se nota un incremento tan marcado como en el S; no obstante en el año 2002 la disminución de la concentración fue muy marcada y tendió para los siguientes 2 años a disminuir (Figura 33-E).

El pretratamiento para la obtención de concentraciones más certeras de los anteriores elementos fue aplicado en 1992 por Ferretti y colaboradores, donde optaron por someter a combustión los núcleos de *Pinus pinea* para disminuir la presencia de oxígeno; y en el que observaron una diferencia considerable en la concentración de P, S y Cl a una escala de 10 años, que tiende al incremento para años más recientes.

En la presente investigación, solo el registro de las concentraciones de P y S coinciden con Ferretti (1992), pero no así la concentración de Cl.

10.6 Comparación de la Incertidumbre en la Concentración de los elementos detectados por PIXE en muestras pretratadas y No Pretratadas.

La efectividad de someter la madera a calentamiento extremo puede observarse en la figura 5.1, ya que por un lado tenemos los núcleos tratados de la forma tradicional, pudiendo detectarse a los elementos Mn, Fe, Cu y Zn (Figura 34) y en las muestras pretratadas se detectaron además S y Cl.

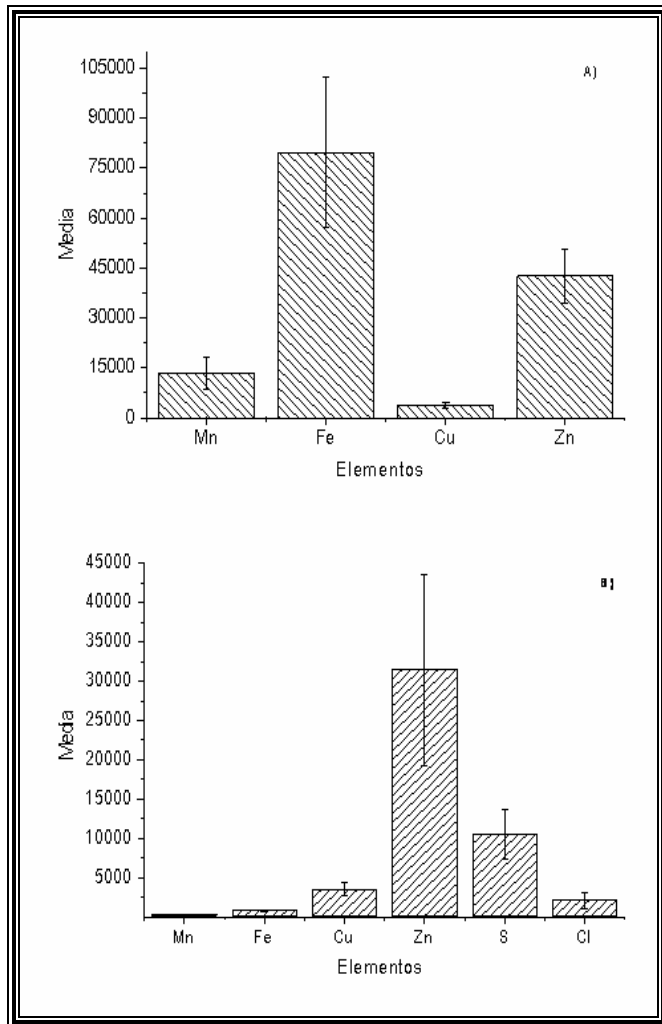


Figura 34- Comparación de la incertidumbre en la concentración de los elementos detectados por PIXE, entre los núcleos tratados con el método tradicional (A) y los pretratados (B).

La distribución de la incertidumbre en la Figura 34-A) se encuentra en unidades de 1×10^4 , para los elementos Mn, Fe y Zn.

Para las muestras pretratadas, en la figura 34-B, las unidades de los parámetros de las incertidumbres se dieron en unidades de 1×10^3 para Mn, Fe, Cu y Cl, mientras que para Zn y S es de 1×10^4 .

De lo anterior da sustento que los detectores usados en el peletón son más sensibles cuando la celulosa ha sido eliminada por la combustión de la madera, además de detectar S y Cl que en la tabla periódica son elementos de menor tamaño que Mn, Fe, Cu y Zn.

10.6 Concentración Anual de Contaminantes en el Noreste y Sureste del Valle de México durante el periodo 1986-2004.

Las características geográficas del Valle de México, dificultan la dispersión del conglomerado de gases contaminantes que son emitidos a la atmósfera por las fuentes fijas y móviles. Aunque el patrón de la dirección y velocidad de los vientos en la ZMVM no es uniforme a lo largo del año e incluso durante un día, se sabe en general que los vientos son más constantes en dirección nor-noreste a sur-suroeste (Lara, 2005) con este criterio fue posible seleccionar las estaciones de monitoreo ubicadas en el Noreste y Sureste, de la ZMVM, de acuerdo con el mapa del SIMAT para la obtención de datos de concentración de SO₂, CO, NO₂ y PST, los cuales estuvieron disponibles a partir del año 1986, a excepción de las PST que lo estuvieron desde 1989 (Figura 35).

⇒ **Dióxido de Azufre.**- Se puede observar que los niveles de elevada Concentración de SO₂ tuvieron lugar de 1986 a 1992, pero la más representativa ocurrió en 1991 con un concentración de 0.0576 ppm, e inmediatamente al año posterior se nota un decremento considerable, que se mantiene en años recientes (Figura 35-A), tal como lo reportan Fenn et al (2002).

Los efectos que provoca este gas son lesiones visibles de las partes aéreas de la planta por acción directa. El SO₂ ingresa a las hojas a través de los estomas y, al afectar el mecanismo de apertura de los poros, perturba los aspectos fisiológicos y bioquímicos de la fotosíntesis, la respiración y la transpiración de las plantas; también se producen lesiones indirectas, especialmente por acidificación del suelo (lesiones de la micorriza) y alteración del crecimiento. Causa lesión a las células epidérmicas y las exposiciones a altas concentraciones de dióxido de azufre pueden producir daños en forma de necrosis foliar y clorosis de la hoja.

⇒ **Monóxido de Carbono.**- Para el CO, el comportamiento de sus oscilaciones es muy similar a las del SO₂, sin embargo el pico de máxima concentración se registró en el año 1990 con 6.818 ppm y el descenso característico del SO₂, también es evidente para CO en el año 1993, que tiende actualmente a decrementar (Figura 35-B).

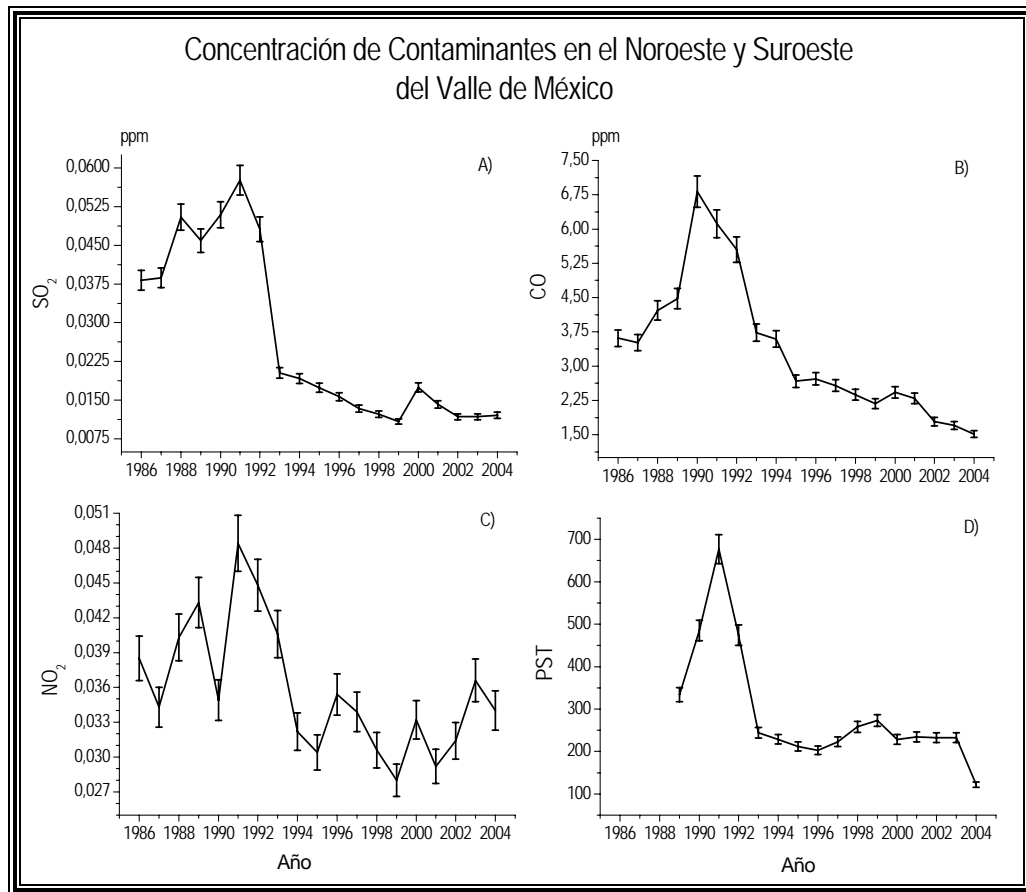


Figura 35.- Registro Anual de la Concentración de SO₂, CO, NO₂ y PST en el Noroeste y

Los automóviles son los responsables del 55 al 95% de la contaminación atmosférica por monóxido de Carbono. La depuración fitobiológica del monóxido de Carbono puede ser pasiva (captación y retención a nivel de follaje) o activa (absorción y posterior acumulación o transporte intracelular). Se estima que el 28% del monóxido de Carbono presente en el aire es absorbido por las plantas

⇒ **Dióxido de Nitrógeno.**- Aunque las concentraciones de este gas muestra oscilaciones muy amplias con respecto a los 2 anteriores, el valor máximo alcanzado es

para el año 1991 (0.0484 ppm) y a partir de 1995, las oscilaciones parecen seguir una periodicidad, sin embargo no rebasan los 0.0366 ppm de NO₂ (Figura 35-C). La depuración del dióxido de Nitrógeno por los árboles ha sido estimada a partir de ciertas mediciones en una reducción teórica de alrededor del 50%; la importancia del estudio de este compuesto es porque es el precursor de la formación de ozono.

⇒ **Partículas Suspendidas Totales.**- Las máximas concentraciones registradas de PST (Figura 35-D), se presentaron en los años 1990, 1991 y 1992; el descenso para 1993 es muy notorio y en general tiende a la disminución de su concentración en años recientes. Llama la atención que presenta el máximo pico de concentración que SO₂ y NO₂, en 1991 con un valor de 676.85 ppm.

Las fuentes emisoras de PST son tanto naturales, como antropogénicas, por la quema de combustibles fósiles en vehículos y procesos industriales; además, también se pueden formar a partir de gases. Los vapores de los metales pesados tienden a condensarse sobre la superficie de las partículas. Por otro lado, pueden servir como núcleos de condensación del agua y de otros vapores con lo cual se producen microgotas en las que pueden ser transportados gases higroscópicos, aumentando el efecto agresor de las partículas.

10.6.1 Concentración Mensual de Contaminantes en el Noreste y Sureste del Valle de México durante el periodo 1986-2004.

A excepción de las PST, donde la base original solo cuenta con registros de concentración anuales, para el resto de los gases, fue posible representar la cantidad de éstos en ppm de manera mensual, como se muestra en la Figura 36.

Aunque las diferencias de concentración entre los meses no son muy amplias, es posible diferenciar los periodos de aumento y decremento mensuales. De tal forma que para los meses Diciembre, Enero y Febrero el incremento en la concentración para las

tres especies es mayor; mientras que Julio, Agosto y Septiembre se caracterizan por presentar menores concentraciones.

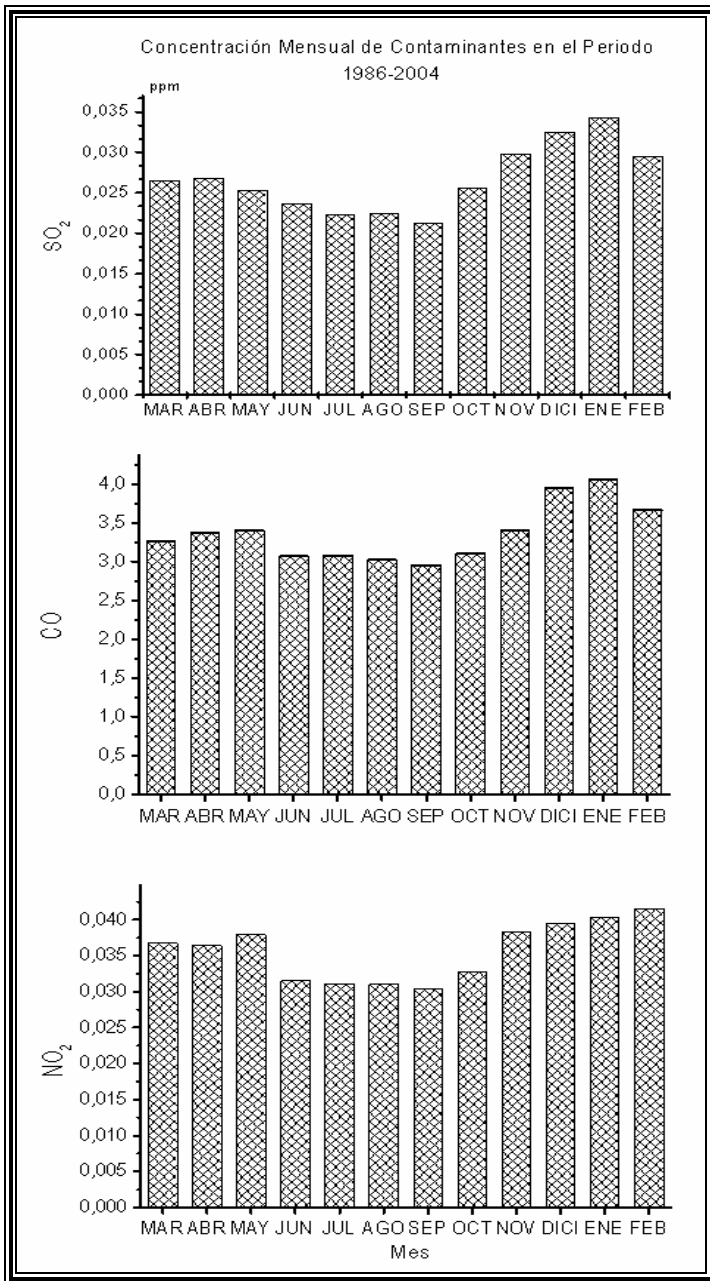


Figura 36.- Concentración mensual de SO₂, CO y NO₂ en el Noreste y Sureste del Valle de México.

Acudiendo a las gráficas de registro de las variables climáticas mensuales, se puede observar, que las máximas concentraciones están acorde con los meses más secos del año, donde la pp no es mayor de 40 mm y la T° muestra sus valores más pequeños.

Por otro lado, los meses donde se presentan las menores concentraciones de gases contaminantes, empatan con las mayores pp registradas mensualmente, las cuales rebasan los 100 mm y la T° se mantiene entre 15 y 15.5 °C.

Los meses de concentración de SO₂, CO y NO₂ que se presentan cuando la T° mensual es mayor, correspondiente a los meses de Abril, Mayo y Junio se mantienen en valores promedios entre las máximas y mínimas concentraciones.

Hasta aquí, la variable climática pp no es la que determina la máxima concentración por depósito húmeda, pero es posible que la presencia de menores T° induzcan al fenómeno de la depósito seco.

10.7 Relación entre las Variables Climáticas y los Contaminantes.

Para ser más gráficos, en la Figura 37 se muestra la asociación anual de SO₂, CO y PST, con respecto a las variables climáticas. Se puede apreciar 2 grupos; en el primero se encuentra el SO₂ vinculado estrechamente con el CO y de forma secundaria con las PST. Por otro lado, en el segundo grupo se observa la cercana asociación del NO₂ con la temperatura, y posteriormente la pp se agrega a este grupo siendo la variable con menos similitud o asociación en el segundo grupo. El vínculo más estrecho establecido entre el SO₂ y el CO, se sustenta en el hecho

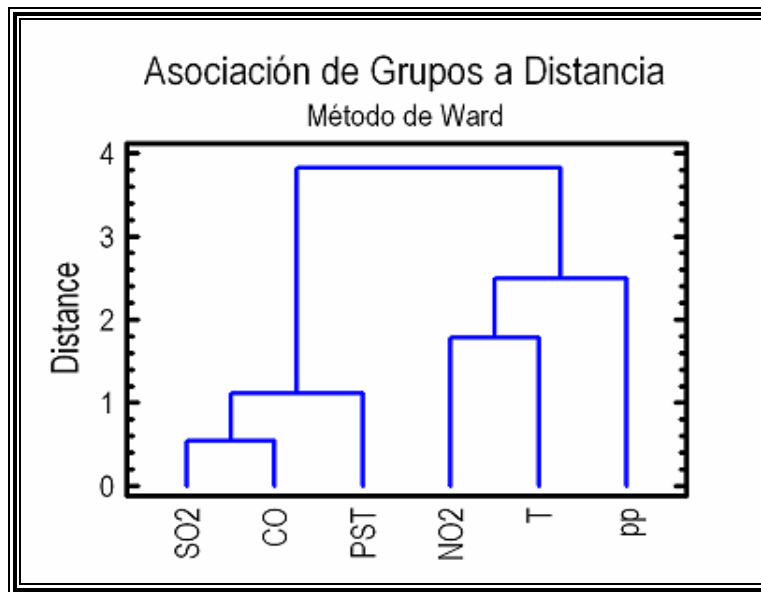


Figura 37.- Dendrograma entre los Contaminantes y las Variables Climáticas por el método de Ward

La relación que existe entre el NO₂ y la temperatura, radica en que el calor aumenta mientras haya más concentración de este contaminante en la atmósfera, ya que absorbe radiación solar selectiva (UV, visible y cercano al IR) y emite radiación térmica.

10.8 Relación entre la Emisión Anual de Contaminantes y el crecimiento de *Pinus hartwegii*.

Para conocer el vínculo establecido entre la emisión de contaminantes en relación con el crecimiento anual de *P. hartwegii*, en el periodo comprendido de 1988-2004, se llevó a cabo una tabla de correlación de Pearson (Cuadro 38). Donde se puede apreciar que el grosor anual con respecto a la emisión de SO₂ tiene un valor de $r=0.541$, mientras que con respecto al CO, NO₂ y PST, el valor no rebasa $r=0.3$.

De acuerdo a lo expuesto por Fenn y colaboradores (2002), desde los años 80's se observó un severo decline en el sur de la Ciudad de México, fenómeno que se atribuyó a las enormes emisión de O₃ y SO₂ generadas en la zona urbana y transportadas por los vientos con dirección sur-suroeste, hacia las zonas forestales. Y aún cuando la emisión de SO₂ ha sido relativamente controlada desde 1990, el impacto de este contaminante sobre la especie en cuestión sigue siendo muy severo.

Cuadro III.- Correlación de Pearson entre los contaminantes emitidos anualmente y el grosor anual del periodo 1988-2004.

Correlaciones Contaminantes y Crecimiento Anual		GROSOR	SO2	CO	NO2	PST
GROSOR	Correlación de Pearson	1,000	,541*	,262	,296	,222
	Sig. (2-colas)	.	,017	,278	,219	,409
	n	19	19	19	19	16
SO2	Correlación de Pearson	,541*	1,000	,851**	,603**	,835**
	Sig. (2-colas)	,017	.	,000	,006	,000
	n	19	19	19	19	16
CO	Correlación de Pearson	,262	,851**	1,000	,501*	,699**
	Sig. (2-colas)	,278	,000	.	,029	,003
	n	19	19	19	19	16
NO2	Correlación de Pearson	,296	,603**	,501*	1,000	,425
	Sig. (2-colas)	,219	,006	,029	.	,100
	n	19	19	19	19	16
PST	Correlación de Pearson	,222	,835**	,699**	,425	1,000
	Sig. (2-colas)	,409	,000	,003	,100	.
	n	16	16	16	16	16

*. Correlación con un nivel de significancias de 0.05 (2-colas).
 **. Correlación con un nivel de significancia de 0.01 (2-colas).

Para los 3 contaminantes restantes, el grado de asociación es muy similar entre sí con respecto al crecimiento anual, siendo mayor el NO₂ con $r=0.296$, seguido del CO con $r=0.262$ y por último las PST con $r=0.222$. Valores que no son significativos comparados con el SO₂. También cabe señalar que de la relación establecida entre los contaminantes, se destacan 2 valores de gran asociación entre SO₂-CO ($r=0.851$) y SO₂-PST ($R=0.835$) y de CO-PST ($r=0.699$).

10.8.1 Similitud entre los Crecimientos Anuales de *P. hartwegii* con Respecto a las Emisiones de Contaminantes.

En la figura 38, se muestra la similitud del crecimiento anual de *P. hartwegii*, en correspondencia con las emisiones de SO₂, CO, NO₂ y PST detectadas en el mismo año del crecimiento del anillo. De este gráfico se puede mencionar que existen dos grupos diferenciados, el primero consta de 12 crecimientos, divididos en 3 subgrupos; y el segundo grupo consta de 4 crecimientos ubicados en 2 subgrupos. Acudiendo a la figura 31 se puede sustentar esta agrupación, ya que de 1989 a 1991 se registraron las menores emisiones de contaminantes, mientras que para el año 1992 a 2004, el descenso de

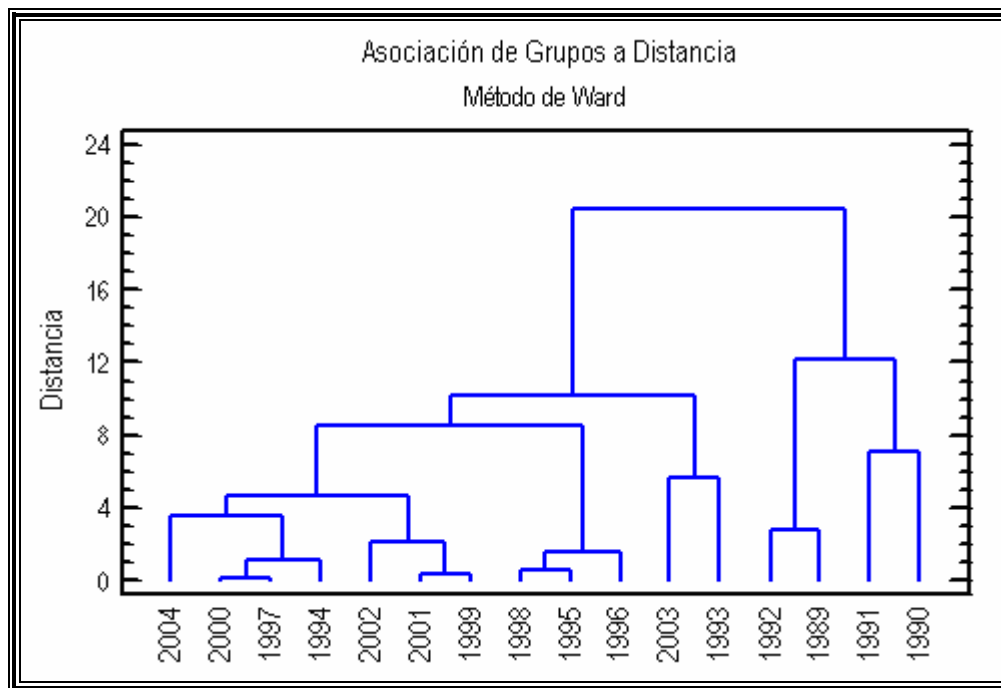


Figura 38.- Dendrograma entre el Crecimiento Radial en Correspondencia con la emisión de SO₂, CO, NO₂ y PST anual del Periodo 1989-2004.

emisiones fue paulatino y por lo tanto la zona de estudio estuvo sometida a cantidades menos agresivas de contaminantes.

En el segundo grupo puede observarse que es más cercana la relación entre los crecimientos dados en 1989-1992 con respecto a los crecimientos de 1991-1990. Lo anterior puede apoyarse, ya que en 1991-1990 fueron registrados menos grosores en el anillo (1.26 y 1.30 mm respectivamente) y la mayores emisiones de SO₂ (0.0576 y 0.0509 ppm), CO (6.118 y 6.818 ppm), NO₂ (0.0484 y 0.349 ppm) y PST (676.85 y 485.22 ppm). Por otra parte, el crecimiento de 1992 y 1989 tienen mayor grosor en correspondencia con los datos anterior y posterior de los máximos niveles de contaminantes.

En el primer grupo, las asociaciones más estrechas se presentan en los crecimientos del año 2000-1997, 2001-1999 y 1998-1995. En orden creciente, los años que presentaron menores grosores fueron 1998-1995 y corresponden con altas concentraciones de SO₂, CO y PST, sin embargo los valores de NO₂ en esos años fueron menores.

El siguiente par de menores crecimientos corresponden al año 2000-1997, con 1.27 y 1.25 mm respectivamente; aquí se presenta un aspecto interesante, ya que para el grosor correspondiente a 1997, la concentración de SO₂, CO y PST son ligeramente menores a los valores de 1995 y 1998, pero para el crecimiento del año 2000, las concentraciones de los mismos contaminantes se encuentran muy elevados. La concentración de NO₂ para ambos crecimientos fueron las más altas, seguidas de lo registrado en 1990-1991.

Para la última asociación, del año 2001-1999 con 1.30 mm ambos, la relación con respecto a los contaminantes es: menores concentraciones de SO₂ y CO para el crecimiento de 1999 y ligeramente más elevadas para el año 2001. Mientras que la concentración de PST se presentó de forma inversa, y la concentración de NO₂ corresponde a los menores valores de todo el registro.

Por lo tanto, puede decirse que los contaminantes que se encuentran más relacionados con el crecimiento anual son SO_2 y CO , así como la concentración de PST no se vincula de la misma forma que los 2 anteriores y el NO_2 no presenta un patrón definido, aún cuando los grosores tienden a un decremento paulatino.

XII. CONCLUSIONES

- ❖ El *Pinus hartwegii* mostró una pérdida del 49% en el grosor de sus anillos, del año 1956-1975 a 1976-2004.
- ❖ La ganancia de crecimiento para *Pinus hartwegii* más evidente ocurrió en 1992, alcanzando un incremento de 4 mm con respecto al año anterior.
- ❖ El crecimiento radial anual del *Pinus hartwegii* está determinado por oscilaciones de pp y T° de un periodo de 2 a 3 años anteriores al crecimiento, más que por ambos parámetros del año anterior al mismo.
- ❖ Existe una periodicidad de aproximadamente 14 años de la pp en el Paso de Cortés durante 1963 a 2005.
- ❖ El crecimiento de primavera en *Pinus hartwegii* obedece al patrón de ascenso y descenso de la pp del año anterior a dicho crecimiento.
- ❖ La eficiencia del pretratamiento de las muestras permite obtener concentraciones más certeras para Ca, K, Fe, Mn, Cu y Zn, y aumenta la sensibilidad de los detectores para cuantificar P, S y Cl.
- ❖ Las mayores concentraciones de SO₂, CO y NO₂ se registró en la temporada seca, mientras que las menores concentraciones corresponden con la época más lluviosa.
- ❖ La concentración anual de NO₂, se encuentra vinculado a la temperatura, mientras que SO₂, CO y PST, no están guardan relación directa con la precipitación y temperatura anual.
- ❖ El crecimiento anual de *Pinus hartwegii* es mayormente influenciado por las concentraciones de SO₂.

XII. RECOMENDACIONES

- ❖ Realizar un registro de cronologías de crecimiento radial para *Pinus hartwegii*, de por lo menos 80 años para tener un panorama más amplio de las oscilaciones representativas en la pérdida o ganancia de grosor.
- ❖ Promediar el crecimiento radial en intervalos de 3 años para obtener datos representativos y facilitar la interpretación de sus fluctuaciones.
- ❖ Realizar las cronologías de *Abies religiosa* y *Pinus montezumae*, para la construcción de un inventario de cronología de coníferas del Parque Nacional Iztapopo.
- ❖ Realizar el conteo de las columnas de células pertenecientes al leño temprano y tardío, para la obtención de datos más precisos como densidad de la madera y contrastar con temperaturas y pp en correspondencia directa a los meses de formación de las columnas.
- ❖ Obtener los parámetros de contaminación por horas del día cuando se desea realizar un análisis de influencia de los contaminantes en el crecimiento estacional de la especie en cuestión.
- ❖ Conformar las bases de datos necesarios para determinar los parámetros del modelo de Cook.
- ❖ Pretratamiento de la madera para la determinación de los elementos $z > 13$.
- ❖ Datar la cronología de las especies arbóreas mexicanas en relación al listado de especies potencialmente útiles para la construcción de cronologías.

XIII. BIBLIOGRAFÍA

Alvarado, R. D., De Bauer, D. L. I. and Galindo A. 1991. Decline y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. *Agrociencia* 3 (1):123-143

Anaya, L. A. L., Hernández, S. R. and Madrigal, S. X. 1980. La Vegetación y los Suelos de un Transecto altitudinal del Dclive Occidental del Iztaccíhuatl (México). *Bol. Tec. Inst. Nac. Invest. For. FAO/IUFRO*. 65. 79 págs.

Augustin, S., Stephanowits, H., Wolff, B., Schröder, J., Hoffmann, E. 2005. Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. *Journal of Forest Research* 124 (4): 313-318.

Baes III, C. F. and McLaughlin S. B. 1984. Trace elements in tree ring: evidence of recent and historical air pollution. *Science*. 224:494-497

Baillie, M. G. L. 1995. Dendrochronology provides an independent background for studies of the human past. *Institute Internazionale di Storia Economica 'F Datini'. Atti della XXVIII Settimana di Studi L'uomo e la Forestta, sec XIII-XVIII, Prato, 8-13 May 1995, a cura di S. Cvaciocchi, Collana Atti delle settimane di studi ed altri convegni number 27, Florence.*

Barnes, D., Hamadah, M. A. and Ottoway, J. M. 1976. The lead, copper and zinc content of tree rings and bark. A measurement of local metallic pollution. *Sci Total Enronmental* 5(1): 63-77.

Biondi, F., Galindo, E. I., Gavilanes, R. J. C. and Elizalde, T. A. 2003. Tree growth response to the 1913 eruption of Volcán de Fuego de Colima, México. *Quaternary Research* 59: 293:299.

Biondi, F. and Waikul, K. 2004. DENDROCLIM2002: AC++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologie. *Computer and Geosciences* 30:303-311.

Bravo, A. H., Sosa, E. R. and Torres, J. R.1991. Ozono y lluvia ácida en la Ciudad de México. *Ciencia* 22: 33-40

Calva, V. G. 1999. Monitoreo de la Depositación Ácida en Zonas Boscosas de la Cuenca de México, usando como superficie de exposición, la corteza arbórea de tres pináceas. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. México.

Carrer, M. and Urbaniti C. 2004. Age-dependent tree-ring growth response to climate in *Larix decidua* and *Pinus cembra*. *Ecology* 85 (3): 730-740

Cheng, Z., Buckley, B. M., Katz, B., Wright, W., Bailey, R., Smith, T. K., Li, J., Curtis, A. and van Green, A. 2007. Arsenic in tree rings at a highly contaminated site. *Science of the total Environment*. Vol. 376:324-334.

Ciesla, A. W. 2002. Non - wood forest products from temperate broad - leaved trees. FAO. Roma. 125 Pp.

Consola, L. 2005 Fuentes principales de datos proxy parareconstrucciones paleoclimáticas. *Ecología Funcional*.

Dans, D. V. F., Fernández, J. F. And Romero, G. A. 1999. Manual de Selvicultura del *Pino radiata* en Galicia « El Pino insigne: *Pinus radiata* D. Don, pino insigne, pino de Monterrey, pino radiata. Agrobite. Galicia España. Cap. I

De Icaza, Del Río G. 1999. Formation and Transformation Mechanisms of Particulate Matter Under Ten Micrometers (PM10) and Ozone (O3) in the Mexico City Metropolitan

Area and the Greater Manchester Area, These, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Mexico DF.

Galindo, B. M.S., 1998. Efecto de El Niño en los nutrientes y el carbón orgánico total de una laguna costera del Noroeste de Baja California. *Revista Ciencias Marinas*. 25(2):225-237

Gobierno del Distrito Federal (DDF). 1996. Informe Anual 1994, Programa de Precipitaciones Ácidas en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Eggle, W.A., 1967. Influence of volcanic eruptions on xylem growth patterns. *Ecology* 48, 644-647.

Farago, M. E. 1994. Plants and the Chemical Elements. Biochemistry, Uptake, Tolerance and Toxicity. VCH. Germany. 64 Pp

Fenn, M. E., de Bauer, L. I. and Hernández-Tejeda. 2002. Urban Air Pollution and Forest Resources at Risk in the Mexico City Air Basin. Ed. Springer. Serie Ecological Studies. Vol. 156. New York USA.

Ferretti, M., Udisti, R. And Barbolani, E. 1992. A new approach to experimental data evaluation from tree ring analysis. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*. Vol. 343 (7): 607-611.

Fritts, C. 1976. Tree rings and climate. San Diego : Academic Press. New York. 255 Pp

García, E. 1973. Modificación al sistema de clasificación climática de Copen Para adaptarlo a las condiciones mexicanas. Enriqueta Garc. México DF. 219 Pp.

Gobierno del Distrito Federal (GDF-INEGI). 2002 Estadística del Medio Ambiente en el Distrito Federal y la Zona Metropolitana.

Génova, M. 2003. Los anillos de crecimiento como indicadores climáticos. Revista de Cienciay Tecnología. Universidad de Barcelona. No. Especial: 29-31

Génova, M. and Martínez, D. 2003. Dendroclimatic Reconstruccions in Southern Sistema Ibérico. Quaternary Climatic Changes and Environmental Crises in the Mediterranean Region. Universidad de Alcalá-Ministerio de Ciencias y Tecnología1 (6)

Govil, G. 2001. Expanding Frontiers of NMR: Understanding Chemistry of Intact Cells, National Academy Science Letters, 25: 17-24

Halffter, G. and E. Ezcurra. 1983. Diseño de una política ecológica para el Valle de México. *Ciencia y Desarrollo* 9(53):89-96.

Hernández, T. R. 2007. Dendroquímica y Dendroecología de Árboles Pino-Oyamel en una zona de Transición del Parque Nacional Zoquiapan. Tesis de Licenciatura. FES-Zaragoza, UNAM. México D.F.

Hernández-Tejeda, T. and Bauer, L. I. 1989. La Supervivenciaia Vegetal ante la Contaminación Atmosférica. Montecillo, México. Colegio de Postgraduados.

Hosker, R. P., Jr. and Lindberg, S. E. 1982. Review: Atmospheric transport, deposition, and plant assimilation of airborne gases and particles. *Atmospheric Environment* 16:889-910. Hosker, R. P. and Lindberg, S, E. 1982

Iraolagoitia, I. and Ruíz, U. E. 2003. Dendroclimatología: el árbol como testigo del pasado climático. *Revista Euskonews & Media*, 204. zbk (2003/03/21-28).

Jáuregui, O. E. 2000. El Clima de la Ciudad de México, temas selectos de Geografía en México. 1ª edic. Plaza y Valdes Editores. Instituto de Geografía de la UNAM. México, D.F. 131 Pp.

Johansson, S. A. E. 1998. PIXE: a Novel Technique for Elemental Analysis. 1^a ed. John Wiley & Sons. 98 Pp.

Kabata-Pendias, A. and Kabata, H. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. 2da ed. ED. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida. USA. Pp. 365

Lara, G. F. 2003. Informe climatológico Ambiental del Valle de México 2003. Gobierno del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente. 144 Pp.

Lara, G. F. 2005. Informe Climatológico del Ambiental del Valle de México 2005. Gobierno del Distrito Federal. Secretaria del Medio Ambiente. Red Automática de Monitoreo Atmosférico. 198 Pp.

León, J. W. 2001. Crecimiento del árbol, tejidos del tallo adulto. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Cátedra de Anatomías de Maderas. Mérida, Venezuela. Pp. 6-18.

Liechty, H. O., Mroz, G. D. and Reed, D. D. 1993. Cation and anion fluxes in the northern hardwood throughfall along an acidic deposition gradient. Can. J. For. Res. 23:457-467.

Linderholm, H. W. 2001. Climatic Influence on scots pine growth on dry and west soils in the Central Scandinavian mountains interpreted from tree-ring widths. Silva Fennica. 35(4): 415-424.

Lovett, G. M., Lindberg, E. S., Richter, D. D. and Johnson W. D. 1985. The effects of acidic deposition on cation leaching from tree deciduous forest canopies. Can. J. Forest. Res. 15: 1055-1060

López, L. M. A., Velásquez, M., González, A. V. y Cetina A. M. 1998. Estado nutrimental de *Abies religiosa* en un área con problemas de contaminación ambiental. Agrociencia 32(1): 53-59.

McClenahan, J. R. and Vimmerstedt, J. 1989. Elemental concentrations in tree rings by PIXE: statistical variability, mobility, and effects of altered soil chemistry. *Can. J. For. Res.* 19, 880-888.

Mojica, A. M. 2003. Dendroanálisis con PIXE, de núcleos de pino y oyamel para el registro de los eventos del depósito atmosférico en los Parques Nacionales Iztapopocatépetl y Zoquiapan. Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Carrera de Biología. FES-Zaragoza UNAM.

Munguía, C. M. E and Pérez, N. J. 2003. La Contaminación Atmosférica en el sur de la zona Metropolitana del Valle de México. *Rev. Ints. Nac. Enf. Resp. Mex.* 16:48-53.

Muñoz, C. R., Ortuño, M. C., Granados, G. M. G., López, V. G. S., Pérez, N. V., Jaimes, P. M. C. 2006. La Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México, 1986-2005. Sistema de monitoreo atmosférico, SIMAT. Secretaría del Medio Ambiente. Ciudad de México. 86 Pp.

Musálem, S. M. A. Y Solís, M. A. 2000. Monografía de *Pinus hartwegii*. SAGAR.INIFAP.CIRSE Campo Experimental Valle de México. Libro Técnico No. 3, Chapingo, Estado de México. 96 Pp.

Oliveira, H., Fernandes, E. A. N. and Ferraz, E. S. B. 1996. Determination of trace elements in tree rings of *Pinus* by neutron activation analysis. *Journal of Radionalytical and Nuclear Chemistry.* Vol. 217 (1): 125-129.

Pais, I. and Benton, J. 1997. *The handbook of trace elements.* ED. Lucie Press. Pp 223.

Puckett, L. J. 1990. Time and pH dependent leaching of ions from deciduous and conifers foliage. *Can. J. For. Res.* 20:1779-1785.

Reimann, C., and Caritat, P. 1998. *Chemical Elements in the Environmental.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Germany.

Robles, M. G. 2003. Dendroquímica con PIXE con pino y oyamel, para el registro retrospectivo de 30 años de depósito atmosférico, en el Desierto de los Leones y el Chico. Tesis de Licenciatura. México D.F.

Quadri, T. G. y Sánchez, C. R. L. 1994. La Ciudad de México y la contaminación atmosférica. ED. Limusa. México, D.F. Pp. 318.

Razo, A. G. 2004. Registro de los Metales Pesados con PIXE en anillos de crecimiento de árboles de los Parques Nacionales Desierto de los Leones y El Chico, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. Carrera de Biología. FES-Zaragoza, UNAM.

Rollet, B. 1980. Interet de L'Etude del Ecorces dans la Determination des Arbres Tropicaux Sur Pied. Reveu Bois et Forests des Tropiques 194: 3-128.

Ruvalcaba, S. J. L. 2001. Aplicación de PIXE al estudio de Muestras de Interés Biológico. TIP, Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas 4(2):93-99.

Schweingruber F.H. 1983. Der Jahrring. Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie. Bern und Stuttgart. 234pp

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

Sheppard, P. R. and Witten, M. L. 2005. Laser trimming tree-ring cores for dendrochemistry of metals. Tree Ring Research. Vol. 61 (2): 87-92.

SIMAT 2006, con datos "Geo Ciudad México, 2003

Solís, R. L. 2002. Contribución al conocimiento de la población de *Pinus hartwegii* Lindley en el Pico de Orizaba, Veracruz, México. Tesis de Maestría. 130 Pp.

Stokes, M. A. and Smiley, T. L. 1968. An introduction to tree-ring formation dating. Chicago: University of Chicago Press. Tucson. 73 Pp.

Szeicz, J. M. and MacDonald, G. M. 1995. Dendroclimatic reconstruction of summer temperatures in northwestern Canada since A.D. 1638 based on age-dependent modeling. *Quaternary Research* 44:257-266

Tardif, J. and Stevenson, D. 2001. Radial growth-climate association of *Thuja occidentalis* L. at the northwestern limit of its distribution, Manitoba, Canada. *Dendrochronologia*. 19 (2): 179-187.

Worbes, M., Staschel, R., Roloff, A. & Junk, W.J. 2004. Tree ring analysis reveals age structure, dynamics and wood production of a natural forest stand in Cameroon. *Forest Ecology and Management* 173(1-3): 105-123.

Worbes, M. 2004. Tree ring analysis. Elsevier Ltd. Sample Article.

Yeh, H. I. and Wensel, C. L. 2000. The Relationship between tree diameter growth and climate for coniferous species in northern California. *Can. J. For. Res.* 30: 1463:1471.

Referencias Electrónicas

Cocks, M. 2000. How a Stem Grows.

<http://www.botany.ac.za/ecotree/trunk.meristemB.htm>

González, M. and Raisman, J. 2000. Crecimiento Secundario: Corteza.

<http://www.efn.uncor.edu/dep/biologia/intrbiol/corteza.htm>

Ott-Reeves, E. 2000. Chapter 33: Ítems.

http://www.alpha1.net/~brianr/etor/ch_33.htm

Peichoto, C. A., González, A. and Raisman, J. 2000. Crecimiento Secundario: Madera.

<http://www.efn.uncor.edu/dep/biologia/intrbiol/maderas.hatm>

Sengbusch, P. 2000. Meristems.

http://www.cache.uniamburg.de/biologie/b_online/eo4/o4c.htm

<http://www.ltrr.arizona.edu/>

<http://www.ssn.unam.mx/Tlalpan051016/index.html>

http://telstar.ote.cmu.edu/envIRON/m3/s2/08reg_local.shtml

<http://www.globalchange.umich.edu.htm>

<http://waynesword.palomar.edu/treedate.htm>

http://www.geo.arizona.edu/palynology/geos462/tr_sncsp.gif

http://img.qj.net/uploads/articles_module/67040/tree_rings_f.jpg

<http://www.techno-science.net/forum/viewtopic.php>

ANEXO I
Variables
Climáticas

Año	pp	T° _{correg}
1961	723,9	11,43
1962	577,3	11,21
1963	752,1	11,34
1964	765,5	11,47
1965	877,3	10,87
1966	675,2	10,75
1967	890,3	10,75
1968	753,8	10,78
1969	722,8	11,62
1970	898,3	10,91
1971	579,8	10,23
1972	826,7	10,31
1973	706,4	10,74
1974	555,3	10,51
1975	679,5	11,5
1976	884	11,99
1977	613,3	12,29
1978	840,4	12,33
1979	644,9	12,68
1980	681,4	12,97
1981	608,6	12,83
1982	498,6	13,46
1983	572,6	13,17
1984	632,6	12,82
1985	611	12,7
1986	619,6	12,68
1987	574,3	12,98
1988	746,4	12,9
1989	539,1	12,34
1990	580,4	12,29
1991	724,9	12,07
1992	749,2	11,73
1993	662,6	12,3
1994	628,7	11,59
1995	802,9	12,56
1996	585,4	12,06
1997	678,8	12,17
1998	870,2	12,96
1999	709,2	12,96
2000	625	12,16
2001	658,3	11,98
2002	830,7	12,44
2003	800,1	12,61
2004	735,8	12,08
2005	512	12,81

ANEXO II
Salidas de las
Tablas de
Correlación

Analysis of Variance for pp - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Secciones	68750.9	2	34375.5	3.34	0.0452
RESIDUAL	421706.0	41	10285.5		

TOTAL (CORRECTED)	490457.0	43			

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

The ANOVA table decomposes the variability of pp into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since one P-value is less than 0.05, this factor has a statistically significant effect on pp at the 95.0% confidence level.

Analysis of Variance for T° - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value

MAIN EFFECTS					
A:Secciones	22.8571	2	11.4285	69.04	0.0000
RESIDUAL	6.78724	41	0.165542		

TOTAL (CORRECTED)	29.6443	43			

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

The StatAdvisor

 The ANOVA table decomposes the variability of T° into contributions due to various factors. Since Type III sums of squares (the default) have been chosen, the contribution of each factor is measured having removed the effects of all other factors. The P-values test the statistical significance of each of the factors. Since one P-value is less than 0.05, this factor has a statistically significant effect on T° at the 95.0% confidence level.