



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ZARAGOZA**

**RELACIÓN DEL PORCIENTO DE RETENCIÓN DE  
COPA CON LOS ANILLOS DE CRECIMIENTO DE  
*Abies religiosa* (Kunth) Schldl. & Cham. EN EL  
PARQUE NACIONAL DESIERTO DE LOS LEONES,  
CIUDAD DE MÉXICO**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**B I Ó L O G A  
P R E S E N T A:**

**ALINE TÉLLEZ MATA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
GERMÁN CALVA VÁSQUEZ**

**CIUDAD DE MÉXICO, 26 DE OCTUBRE DE 2021**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, la cual ha representado una segunda casa y que me dio la oportunidad de desarrollarme académica y personalmente.

A las autoridades del Parque Nacional Desierto de los Leones, por permitir el desarrollo de la presente investigación.

Al M. en C. Germán Calva Vásquez por abrirme las puertas de su laboratorio, brindándome más allá de los conocimientos y herramientas a nivel académico, una enseñanza que me ayudo a crecer a nivel personal y emocional, infinitas gracias por siempre estar.

A mis sinodales: M. en C. Armando Cervantes Sandoval, Dr. Efraín Reyes Ángeles Cervantes, Dr. Gerardo Cruz Flores y Biól. Eduardo Alberto Ehnis Duhne, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis, sus observaciones han sido enriquecedoras para la misma.

Al M. en C. Humberto Macías y Dra. Mayra Hernández por brindarme la oportunidad de desarrollar mi servicio social en FES Iztacala, dándome herramientas y conocimientos que enriquecieron mi desarrollo profesional.

A los profesores que, desde mi educación básica, me han sorprendido por la paciencia y la dedicación a su trabajo, porque gracias a la mayoría de ellos, me encuentro en este momento.

A mis entrenadores de atletismo Miguel Victoria de FES Zaragoza, quien comenzó con mi formación en atletismo y por el que surgió mi pasión en este deporte, y a Flavio Camacho de FES Iztacala, quien potencializó mis capacidades y me llevó a exigirme más, superándome a mí misma.

## DEDICATORIAS

A Dios, que a lo largo de este tiempo nos ha acompañado a mí y a mi familia, poniéndonos en ocasiones pruebas muy difíciles, pero siempre sintiendo su presencia en cada paso que daba, porque a pesar del miedo, sabía que él me iba a ayudar y cuidar en todo momento.

A Huguito, no sabes cómo me gustaría que estuvieras aquí y presenciaras este momento tan importante en mi vida, sin embargo, sé que desde el cielo me estás viendo y me estás apoyando, todo esto es en honor a esos hermosos años de vida que me regalaste para compartirlos a tu lado, eres y siempre serás mi mayor fuerza y mi mayor motor, te amo hermano.

A mis padres Miriam Mata y Hugo Téllez, ustedes son dos motores imprescindibles en mi vida, gracias por estar siempre, por brindarme su mano en momentos difíciles, por hacerme saber siempre que a su lado puedo encontrar un apoyo infinito y sobre todo por el inmenso amor que me dan en cada paso que doy, esto no lo hubiera logrado sin ustedes, los amo con toda el alma.

A Trinidad Santín, por ser un ejemplo de vida siempre, esa mujer fuerte y empoderada que nos enseñó a ser independientes, por todo el amor que siempre nos diste, mi agradecimiento hasta el cielo, te amo demasiado abuelita.

A Pedro García, gracias, amor por todo el apoyo que me das día a día, por no permitir que me rinda, por hacerme saber que puedo, por creer tanto en mí y sobre todo por amarme así de bonito, has sido una persona muy importante en este proceso y un motor que me motiva día a día para no rendirme, te amo infinitamente.

A Karla Castillo, gracias por ser mi ejemplo a seguir toda la vida, por ti nació mi gusto por la lectura y el conocimiento, gracias también por ser mi apoyo en días grises y hacerme ver de

manera objetiva las situaciones para darles una mejor solución, te admiro demasiado Karlita, gracias también por amarme tanto, como yo te amo a ti.

A Gilberto Guerra Vera, mi psicólogo, gracias a lo que trabajamos a lo largo de las sesiones, logre llegar a este punto de mi vida y, en estos últimos años he crecido a nivel personal y emocional, infinitas gracias.

A Ricardo y Yazmin, amigos de toda la vida, prácticamente se han convertido en mis hermanos, gracias, porque a pesar del tiempo, me siguen brindando las mismas risas y los mejores momentos, los quiero infinitamente.

A Rosa, Jaqueline y Dani, gracias chicas, porque siempre están ahí para mí, por apoyarme en todo momento y seguir presentes en mi vida, las quiero demasiado.

A Orlando Ambriz, porque nos conocimos en primer semestre y aun cuando nuestros caminos tomaron rumbos distintos, nuestra amistad ha perdurado en estos 8 años, y sabemos que estamos ahí siempre para apoyarnos, infinitas gracias amigo, te quiero mucho.

A Ilse y Daniel, gracias por ser mis mejores amigos, por estar en todo momento a mí lado, por la confianza y los bonitos momentos que pasamos juntos, los quiero con toda el alma.

A mis compañeros de Laboratorio de Contaminación Atmosférica (FES Zaragoza) y Laboratorio de Gestión del Conocimiento (FES Iztacala), gracias por todas esas pláticas compartidas, por las prácticas de campo inolvidables y por todo el apoyo que me han brindado en este recorrido, que ha sido un gran aporte en mi formación.

A mis compañeros de atletismo de FES Zaragoza y FES Iztacala, gracias por enseñarme la importancia de la disciplina y la dedicación, cuando se trata de querer lograr metas.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. MARCO CONCEPTUAL.....	4
2.1 Descripción del <i>Abies religiosa</i> (Kunth) Schltl. & Cham. ....	4
2.2 Ambiente, distribución, requerimientos y vulnerabilidad del oyamel.....	5
2.2.1 Distribución geográfica en México .....	5
2.2.2 Decline forestal y la problemática en el bosque de oyamel .....	7
2.3 Escalas de registro del daño de la copa arbórea .....	10
2.3.1 Arquitectura de la copa.....	12
2.4 Vitalidad y vigor arbóreos .....	13
2.4.1 Anillos de crecimiento.....	17
2.5 Fotosíntesis—respiración—crecimiento .....	18
2.6 Efecto de los contaminantes atmosféricos (O <sub>3</sub> , NO <sub>x</sub> y SO <sub>x</sub> ) sobre la copa de los árboles y su fotosíntesis .....	20
2.6.1 Ozono (O <sub>3</sub> ).....	23
2.6.2 Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ) .....	25
2.6.3 Óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ) .....	27
3. ANTECEDENTES .....	28
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	31
5. JUSTIFICACIÓN.....	32
6. HIPÓTESIS .....	33
7. OBJETIVOS.....	34
8. ÁREA DE ESTUDIO.....	35
8.1 Descripción de la zona de estudio .....	35
8.1.1 Localización geográfica.....	35
8.1.2 Clima .....	36
8.1.3 Suelo .....	37
8.1.4 Vegetación—Fauna .....	37
9. MÉTODO.....	41
9.1 Trabajo en campo .....	41
9.2 Trabajo en laboratorio .....	42
9.2.1 Tratamiento de las muestras .....	42
9.2.2 Análisis de las muestras y datos estadísticos.....	43

10.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
10.1	Tendencia del crecimiento de los anillos.....	46
10.2	Ciclicidad de las cronologías y su relación con los factores exógenos.....	55
10.2.1	Primer valle de crecimiento (1887—1896).....	56
10.2.2	Segundo valle de crecimiento (1917—1926).....	57
10.2.3	Tercer valle de crecimiento (1947—1986) y cresta de crecimiento (1987—2016).....	59
10.3	Ganancia en crecimiento por cada porcentaje de retención de copa.....	73
10.4	Índice de sensibilidad por porcentaje de retención de copa.....	76
10.5	Porcentaje de retención de copa vs. crecimiento de anillos.....	82
11.	CONCLUSIONES.....	87
12.	PERSPECTIVAS Y/O RECOMENDACIONES.....	88
13.	REFERENCIAS.....	89
14.	ANEXO 1: Indicadores de la condición de los árboles.....	100
15.	ANEXO 2: Indicadores de la arquitectura de copa.....	102
16.	ANEXO 3: Patrones de porcentaje de retención de copa SARH (1984). .....	107
17.	ANEXO 4: Régimen climático.....	108

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Oyamel del Archivo Fotográfico del Lab Cont Atm .....	4
Figura 2: Distribución del oyamel en la República Mexicana (tomado de Naturalista, CONABIO, s.f.).....	6
Figura 3: Deterioro del bosque de oyamel en PNDL (Lab Cont Atm FES Zaragoza, 2019) .....	7
Figura 4: Modelo de daño en copa (ARNEWS, US FHM y Europe: UN/ECE ICP Forests) .....	8
Figura 5: Plaga por muérdago en oyamel del PNDL .....	9
Figura 6: Primeras escalas de registro de vigor de copa .....	10
Figura 7: Escala de Porcentaje de Retención .....	10
Figura 8: Escala de daño de copa de la USDA (1990).....	11
Figura 9: Copa cónica cuya base de la copa (comienzan a 1.60 m sobre el nivel del suelo y rebasa los 35 m de altura).....	12
Figura 10: Modelo teórico propuesto para explicar el decline forestal y su efecto en el vigor del bosque (tomado de De Vries et al., 2000) .....	16
Figura 11: Anillos de crecimiento y división de sus componentes .....	17
Figura 12: Perdida del follaje de un rodal de árboles de oyamel .....	19
Figura 13: Interacción fotosíntesis-respiración-crecimiento y sus factores limitantes ( <a href="http://www.hiilipuu.fi/articles/plant-respiration">http://www.hiilipuu.fi/articles/plant-respiration</a> ).....	20
Figura 14: Régimen climático típico mensual de la Ciudad de México y de la ZMVM (tomado de Herrejón Gómez, 2018) .....	21
Figura 15: Registro de concentración de ozono máximo anual del promedio móvil de 8 horas en la Ciudad de México (1990-2016), el límite máximo permisible de ozono (línea roja=0.070 ppm) de acuerdo con la NOM-020-SSA1-2014. Modificada de Herrejón Gómez (2018) ....	24
Figura 16: Registro de concentración de dióxido de nitrógeno promedio horario en la Ciudad de México (1990-2016), la línea roja indica el límite de concentración máxima de dióxido de nitrógeno de acuerdo con la NOM-023-SSA1-1993 (0.210 ppm). Modificada de Herrejón Gómez (2018).....	26
Figura 17: Registro de concentración de dióxido de azufre promedio anual en la Ciudad de México (1990-2016), la concentración máxima permisible de dióxido de azufre (línea roja=0.025 ppm) de acuerdo con la NOM-022-SSA1-2010. Modificada de Herrejón Gómez (2018) .....	27



Figura 18: Mapa de ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones, donde se muestra el paraje “El Pantano” (Modificado de CONANP, 2006).....	36
Figura 19: Parque Nacional Desierto de los Leones (Lab. Cont. Atm. FES Zaragoza, 2017).....	39
Figura 20: Extracción de los núcleos con barrena Pressler de 17” y conservación de las muestras en popotes, B) medición de la longitud de la albura y el duramen de los núcleos extraídos .	42
Figura 21: Donde A) Secado de las muestras en estufa (tomado de Cruz Muñoz, 2007), B) orientación de las muestras y adhesión a los bastidores, y C) pulido de las muestras .....	43
Figura 22: A) Prefechado de las muestras, B) colocación de las muestras en el scanner y C) lectura de los anchos de anillo en el programa WinDENDRO .....	44
Figura 23: Ancho de anillos de las muestras en el programa WinDENDRO .....	45
Figura 24: Cronología general con las oscilaciones en crecimiento de los cuatro %RC .....	47
Figura 25: Cronologías individuales de árboles con 25 y 50% retención de copa.....	53
Figura 26: Cronologías individuales de árboles con 75 y 100% retención de copa.....	54
Figura 27: Cronologías de los porcentajes de retención de copa (%RC) por década .....	56
Figura 28: Línea del tiempo de eventos meteorológicos en México.....	58
Figura 29: Línea del tiempo de contaminación atmosférica de la Ciudad de México .....	64
Figura 30: Variación del ancho promedio de anillo de <i>Abies religiosa</i> en cada porcentaje de retención de copa.....	66
Figura 31: Prueba de asociación entre porcentaje de retención de copa de acuerdo con su ancho de anillos .....	71
Figura 32: Índice de sensibilidad por década en cada porcentaje de retención de copa .....	72
Figura 33: Prueba de asociación entre porcentaje de retención de copa y ganancia en crecimiento .....	76
Figura 34: Tendencia en índice de sensibilidad vs. ganancia en crecimiento (25 y 50% RC) .....	80
Figura 35: Tendencia en índice de sensibilidad vs. ganancia en crecimiento (75 y 100% RC) ....	81
Figura 36: Gráfica de diferencia de medias de ancho de anillo entre porcentajes de retención de copa .....	83
Figura 37: Estado de la copa de oyamel del paraje Casa de Piedra .....	86

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Superficie abarcada por bosque de <i>A. religiosa</i> en México .....	6
Cuadro 2: Indicadores de la arquitectura de la copa .....	13
Cuadro 3: Conceptos de vitalidad .....	14
Cuadro 4: Dosis umbral de ozono (O <sub>3</sub> ) y dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) para la supresión de la fotosíntesis de plántulas y plántones de árboles forestales (Tomado de S. G. Pallardy & Kozlowski, 2008) .....	22
Cuadro 5: Estudios de la relación entre la vitalidad de los árboles con su vigor .....	29
Cuadro 6: Caracterización de la vegetación del paraje “El Pantano” (datos recabados en campo) .....	40
Cuadro 7: Matriz de datos utilizada para la generación de pruebas estadísticas.....	45
Cuadro 8: Varianzas del ancho de anillo de los 3 ciclos.....	49
Cuadro 9: Requerimientos ambientales de <i>A. religiosa</i> .....	49
Cuadro 10: Ancho promedio de anillos de crecimiento en cada década, por porcentaje de retención de copa.....	50
Cuadro 11: Precipitación (Pp) media acumulada por década vs. Ancho de anillos (AA) por cada %RC .....	63
Cuadro 12: Concentración de contaminantes atmosféricos ZMCVM vs. Ancho de anillos (mm)	69
Cuadro 13: Ganancia en crecimiento (mm) por década, para cada porcentaje de retención de copa .....	74
Cuadro 14: Relación del registro de los contaminantes atmosféricos con la ganancia (promedio por década) .....	75
Cuadro 15: ANOVA para la ganancia en crecimiento de cada porcentaje de retención de copa ..	76
Cuadro 16: Índice de sensibilidad (I.S.) por década, para cada porcentaje de retención de copa.	78
Cuadro 17: ANOVA para las variables de índice de sensibilidad .....	78
Cuadro 18: Prueba de rangos múltiples de media (método: LSD con 95% de confianza) .....	82
Cuadro 19: Prueba de rangos múltiples con su significancia y límites (método: LSD 95%; * indica una diferencia significativa) .....	83
Cuadro 20: Tabla ANOVA de las medias de ancho de los anillos .....	84

## RESUMEN

Desde la década de los 80 se han reportado los daños que causa el ozono en las copas de *Abies religiosa* del Parque Nacional Desierto de los Leones (Fenn et al., 2002), Ciudad de México; son pocas las publicaciones que relacionan el efecto que causa la pérdida de copa de los árboles en el crecimiento de sus anillos. Es por ello, que el objeto del estudio fue determinar el crecimiento de los anillos en relación con el porcentaje de retención de copa.

Para realizar el muestreo, se seleccionaron los rodales, eligiendo cuatro clases de retención de copa (25%, 50%, 75% y 100%). Ubicándolos dentro del paraje “El Pantano”, los árboles elegidos que no presentaran daño mecánico, ni parásitos, a fin de coleccionar dos virutas por árbol y fueron extraídas en las caras ubicadas perpendicularmente a la pendiente, completando seis pares por clase de copa, se registró la altura total del árbol y su diámetro normal, como lo describen Grissino-Mayer (2003) y Fritts (1976), se llegó a un total de 48 núcleos. Los procedimientos para la datación, el marcaje de los anillos verdaderos, y el registro del ancho de los anillos se realizó de acuerdo a lo descrito por Stokes & Smiley (1996), y con ayuda del programa WinDENDRO (2003b). Se realizó una línea del tiempo considerando factores endógenos y exógenos para establecer la influencia de ellos en el bosque de oyamel del PNDL.

Como resultado se obtuvo una cronología general que dató de 1866 a 2016, de la cual se describieron tres valles y una cresta en el crecimiento, dos valles corresponden al período antes de la industrialización (1881—1894 y 1915—1924) y el otro durante esta (1953—1986); y la cresta abarcó los años 1987—2016. Los árboles con retención de copa del 25% fueron los más longevos. De las cronologías por décadas se demostró un descenso en el crecimiento para todas las categorías de copa vinculados a los años de mayor contaminación atmosférica, arrojando un ancho del anillo de crecimiento para las categorías 25 y 50% que oscilo entre 1.007 y 2.369 mm en el período de 1947—1986, y para las categorías 75 y 100% oscilo entre 1.379 y 2.260 mm en los años 1957—1986. Los menores anchos de anillo promedio correspondieron a las categorías de 25 y 50%, oscilando entre 2.60—2.94 mm, mostrando una diferencia significativa con 75 y 100% RC, que tuvieron valores de entre 2.95—3.70 mm.

Debido a lo anterior, se concluyó que hay un efecto de porcentaje de retención de copa en el crecimiento de los anillos de *Abies religiosa* del Parque Nacional Desierto de los Leones.

# 1. INTRODUCCIÓN

En Escandinavia, al sur y centro de Europa, llegando a España (De Vries et al., 2000a; 2000b; Klap et al., 2000; Van Leeuwen et al., 2000), se registró un daño en los bosques, del cual se formuló la hipótesis que los factores estresantes eran: la química del suelo, la temperatura, el clima, sequía, el depósito de contaminantes y la alta concentración de dióxido de azufre (SO<sub>x</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), amonio (NH<sub>x</sub>) y ozono (O<sub>3</sub>). Se relacionaron con los patrones de la defoliación de los árboles y con la baja tasa de crecimiento (área basal) durante el periodo 1986—1995 probando el decline forestal, sugerido por investigadores de Alemania.

Analizando las cronologías de *Picea abies* y *Fagus sylvatica* (anchos de anillo) se probó otro aspecto del decline forestal, la contribución de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> en la fisiología de los árboles *Picea abies* y *Fagus sylvatica* disminuyendo su crecimiento, el efecto se registró en Polonia, Eslovenia, Rumania, Ucrania y República Checa (Muzika et al., 2004). El índice del área basal (BAI) de *Fagus sylvatica* disminuyó en casi un 50% y *Picea abies* en un 20%, durante los últimos 45 años. Los anillos de crecimiento de ambas especies se correlacionaron negativamente en sitios de alta contaminación. En Lituania (Augustaitis et al., 2007) se comprobó el efecto de retraso en el crecimiento por el depósito ácido húmedo (H<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y por la alta concentración de gases (SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

Un factor común, la disminución del vigor, fue la conclusión en estudios realizados en Europa y EE. UU. (Schomaker et al., 2007), éste último determinó tres categorías y se vinculó con el estado de la copa. Así mismo, Pallardy & Kozlowski (1981) y Smith (1981) publicaron el efecto de ozono (O<sub>3</sub>), hidrocarburos (HCs), partículas suspendidas totales (PST), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y de azufre (SO<sub>x</sub>) a diferentes escalas: celular (fisiología), árbol (yemas de

crecimiento, semillas inviables), población (afectando principalmente brízales y seniles) y de estructura del ecosistema, referido como decline forestal.

En la Ciudad de México, Watmough & Hutchinson (1999) determinaron quinquenalmente la concentración de metales pesados (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni y Cr) en anillos de crecimiento del oyamel de Parque Nacional Desierto de los Leones (PNDL). La mayor concentración fue para Pb y Cd durante los 20s y 40s (los mayores registros durante los años 60s); le siguieron el Zn, Cu y Ni, que aumentaron a partir de los años 80s, en ambas situaciones hubo una disminución de crecimiento (de 1.7 mm a 0.2 mm) similar a lo reportado en Europa y EE UU. Así también Calva (2012) registró una disminución (de 3 mm a 0.5 mm) en el crecimiento del oyamel del PNDL para la fase 1900 a 2000, registrando Fe, Mn, Cu, Zn, Pb, Sn y Br.

La **fotosíntesis producida por** la copa determina la tasa de crecimiento de los anillos (madera temprana y tardía), los metabolitos y el gasto de carbohidratos (respiración), por ello, si la contaminación afecta alguna porción de ella, obligándola a reponer el follaje dañado, la interrogante a responder es ¿cómo influye la retención de copa en el crecimiento celular y por ende en el ancho del anillo?

Debido a lo anterior, el objeto del trabajo es relacionar cuatro estados de porcentaje de retención de la copa (25%, 50%, 75%, 100%) con el grosor del anillo de crecimiento de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. del Parque Nacional Desierto de los Leones (PNDL), con la preponderancia de determinar si la retención de copa < al 50% ya no recupera su vitalidad y declina.

## 2. MARCO CONCEPTUAL

### 2.1 Descripción del *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham.

Es un árbol corpulento y monoico (figura 1), con una altura que oscila de 40 a 60 m; cuyo diámetro podría ir de los 40 cm a 1.5 m, la corteza es lisa en árboles jóvenes y gruesa con placas escamosas de color grisáceo en adultos, con ramas horizontales y hojas perennes, alternas, de largo van de 20 a 30 mm y de ancho 1.5 mm. Tienen ápice agudo y córneo, su base es torcida, son de color verde oscuro en el haz y glaucas en el envés (Espinosa Garduño, 2010).

Sus flores son estructuras reproductivas masculinas (oblongas, de color violáceo) y femeninas (conillos subcilíndrico-oblongos de color rojizo) que se presentan en diciembre; su



fructificación aparece de noviembre a enero, los conos maduros son cilíndrico-oblongos, miden de 10 a 16 cm de largo y de 4 a 6 cm de ancho, son casi sésiles, antes de madurar son azul púrpura oscuros; las brácteas son púrpura o verdosas, de moderada longitud; sus semillas son aladas, resinosas, lisas, de color castaño brillante, con un largo de 9 a 10 mm y un ancho de 5mm, el ala mide 22 a 25 mm de largo por 10 a 15 mm de ancho, su dispersión ocurre entre marzo y abril, se despegan cuando los conos se desintegran en la madurez (7 a 9 meses luego de la polinización) (op cit).

Figura 1: Oyamel del Archivo Fotográfico del Lab Cont Atm

## 2.2 Ambiente, distribución, requerimientos y vulnerabilidad del oyamel

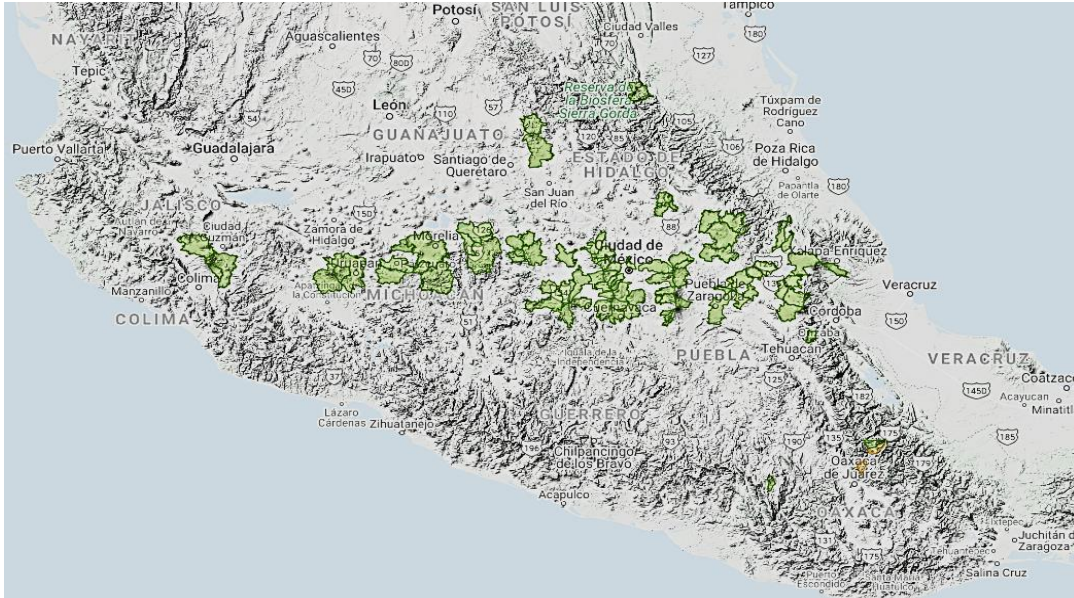
Gómez Díaz et al. (2011) señalan que las condiciones óptimas de *Abies religiosa*, son: precipitación media anual (> 800 mm), temperatura media anual (7 a 16° C), temperatura media del mes más frío (4 a 12° C), y temperatura media del mes más cálido (8 a 18° C); así mismo Alcocer et al. (1984) citado en Vargas (1997) reportan que los suelos para su desarrollo son de texturas arcillosa-limosa, arenosa-arcillosa y arenosa-limosa, son profundos, bien drenados y húmedos, con un pH de 5—7 y ricos en materia orgánica.

Los agentes ambientales que propician vulnerabilidad de la especie son: sequía, por un período  $\geq$  a 4 meses (Gómez Díaz et al. 2011) y los escarabajos descortezadores (*Pseudohylesinus variegatus*, *Gnathotrichus sulcatus*, *Pityophthorus elatinus* y *P. blackmani* (Cibrián et al., 1995)), lo colonizan cuando tiene una condición de bajo vigor, llegando a producir su muerte.

### 2.2.1 Distribución geográfica en México

Según Espinosa Garduño (2010) crece en altitudes de entre 2,600 a 3,500 m s n m en bosques templados y con alta pluviosidad, con veranos húmedos y caída de nieve invernal. Es nativo de las montañas centrales y del sur de México (Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur) y del oeste de Guatemala (Naturalista, CONABIO, s.f.). CONAFOR (2003) hizo referencia de su distribución en los estados: Ciudad de México, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Michoacán, Jalisco, Morelos, Estado de México, Guerrero y Tlaxcala (figura 2).

Benavides-Meza et al. (2011) refiere que los servicios ambientales son imprescindibles para los habitantes y el mejoramiento ecológico, siendo un componente vital de los bosques periurbanos de la Ciudad de México, en el cuadro 1 se observa el área abarcada del bosque de oyamel a escala nacional.



**Figura 2: Distribución del oyamel en la República Mexicana (tomado de Naturalista, CONABIO, s.f.)**

**Cuadro 1: Superficie abarcada por bosque de *A. religiosa* en México**

Año	Veg Prim	Veg Sec	Superficie total (ha)	Referencia
1993	137,786.69	9,732.93	147,519.62	FAO, 2015
2002	125,387.03	16,882.44	142,269.47	
2007	124,508.38	24,531.24	149,039.62	
2011	124,323.40	25,135.10	149,458.49	
2014	SD	SD	157,737	SEMARNAT, 2018

En contraste con las cifras citadas, de los estados que recuperaron su vegetación natural entre 2002 y 2011, está la Ciudad de México con 0.02% anual (SEMARNAT, 2015) y con una recuperación de la vegetación natural primaria de 0.97% entre 2002 y 2014 (SEMARNAT, 2018).

A pesar de que las cifras indiquen que el bosque de oyamel ha recuperado su extensión nacional en los últimos doce años, no significa que su salud forestal se encuentre en óptimas condiciones (figura 3), prueba de ello son las diversas investigaciones que han demostrado como el decline sigue afectando la salud de dicho ecosistema (Alvarado-Rosales & Hernández-Tejeda, 2002; Saavedra et al., 2003; Pérez Suárez et al., 2006 y 2008; Flores-Nieves et al., 2011).





**Figura 3: Deterioro del bosque de oyamel en PNDL (Lab Cont Atm FES Zaragoza, 2019)**

### **2.2.2 Decline forestal y la problemática en el bosque de oyamel**

Yunus & Iqbal (1996) confirmaron que los impactos directos de  $O_3$  sobre el follaje son: el cierre parcial de las estomas, la degradación de las ceras epiteliales y la reducción de la tasa fotosintética hasta en un 38%. Así como, el  $SO_2$ ,  $NO_x$  y la deposición ácida destruyen la estructura de las células de las hojas, en los estomas desintegran las columnas de los tilacoides, la matriz del citoplasma y los aglutina en los plástidos, dañan la mitocondria y reducen el número de ribosomas.

De acuerdo con Wareing (1964), la productividad del árbol depende del incremento neto de peso en seco, que busca un equilibrio entre fotosíntesis y respiración; al aumentar esta última, como reflejo de una sequía fisiológica y de un debilitamiento del sistema radicular. Así mismo, la deposición ácida (estudiados los efectos en Europa y EE UU) cambia la composición y

disponibilidad de los nutrientes, se inhibe la absorción de agua, la formación de raíces finas y vínculo con las micorrizas; como lo explicó De Vries et al., (2000 a y b).

El modelo Europeo que explica el decline forestal (Burley et al., 2004) *“Indicadores de la condición de los árboles considerados en los programas de monitoreo de la salud forestal en América del Norte y Europa<sup>1</sup>”* (Anexo 1A y B) se logró por consenso en Canadá ARNEWS, US FHM y Europe: UN/ECE ICP Forests (Nivel I y Nivel II), los indicadores visuales de la condición del árbol, el follaje, clorosis, estructuras reproductivas, ramas (elegidas diferentes puntos de la copa), y el tallo (Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft, 1998; Innes, 1993; Lachance & DesRoches, 1994; Olson et al., 1992; Tallent-Halsell, 1994).

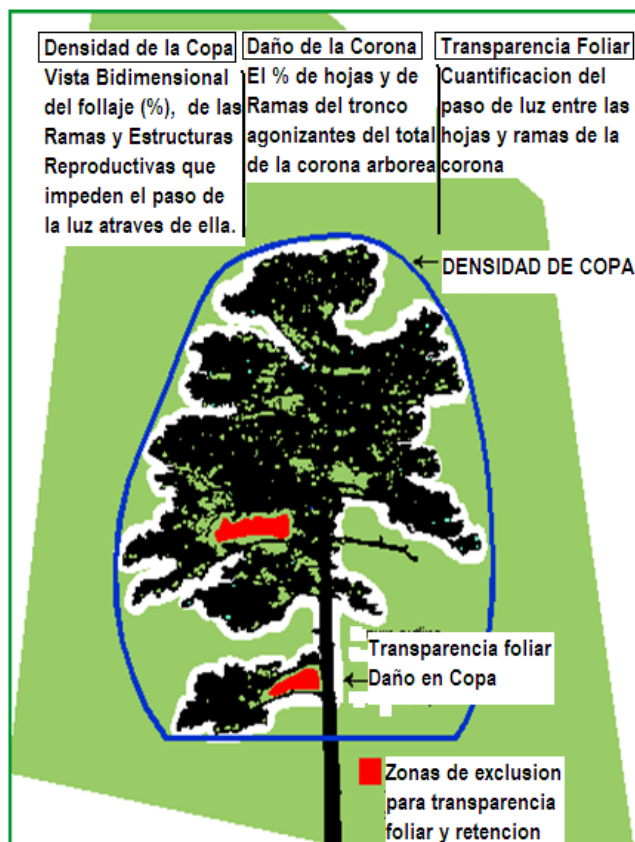


Figura 4: Modelo de daño en copa (ARNEWS, US FHM y Europe: UN/ECE ICP Forests)

Así mismo Innes (1993) propuso en el modelo, los posibles indicadores no visuales de la condición de los árboles (figura 4) considerando la morfofisiología del árbol. Ciesla & Macías-Sámano (1987) registraron **síntomas** de decline en el Parque Nacional Desierto de los Leones, y documentaron la plaga del barrenador en el bosque de oyamel, subsiguientemente Alvarado-Rosales & Hernández-Tejeda, (2002) confirmaron el aumento de la superficie dañada (árboles muertos y declinados), el fenómeno se

<sup>1</sup> México es miembro activo de la comisión y sus representantes no entregaron los indicadores de la condición de los árboles de bosques y selvas de México.

atribuyó a la contaminación del aire de la Ciudad de México, sugerido por Ciesla (op cit). Alvarado-Rosales & Hernández-Tejeda (2002) publicaron modelo conceptual del decline en *espiral del decline del oyamel* del Parque Nacional Desierto de los Leones. Los autores propusieron un daño gradual, *factores de predisposición* (envejecimiento del rodal, contaminación atmosférica, déficit de humedad del suelo e incremento en la temperatura) que son prolongados y cambian lentamente, mermando la resistencia de los árboles, *factores de irritación* (insectos defoliadores, heladas, contaminación atmosférica y sequía).

Los factores anteriormente descritos, ejercen efectos de estrés por cortos períodos de tiempo (fisiológicos o biológicos) causando muerte principalmente en el dosel de los árboles; finalmente, cuando los árboles están severamente dañados, se presentan los *factores de contribución* que son plagas (figura 5) y enfermedades, las cuales causan la muerte del oyamel.



**Figura 5: Plaga por muérdago en oyamel del PNDL**



### 2.3 Escalas de registro del daño de la copa arbórea

Investigadores de los Estados Unidos de Norte América (Keen, 1943) determinaron la

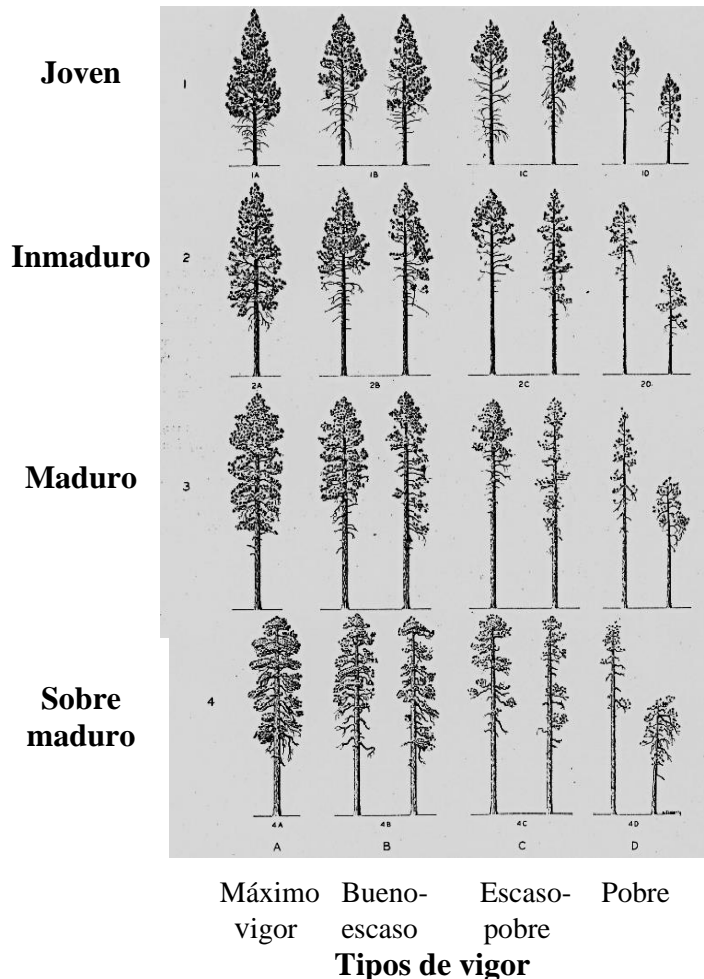


Figura 6: Primeras escalas de registro de vigor de copa

(D), ascendente (A) y lateral (L). Así mismo para la década de los 80s la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) la aplicaba para el registro de vitalidad arbórea en la ZMCVM.

primera escala de susceptibilidad en la que clasificaron el daño arbóreo (*Pinus ponderosa*) producido por insectos barrenadores, la predisposición la provocan los incendios forestales y luego el ataque de los insectos (figura 6). Posteriormente agregaron los porcentajes de retención de copa (figura 7) y lo vincularon con el tipo de mortalidad: irregular (I), descendente

% DE COPA RETENIDA	0	25%	50%	75%	100%
TIPO DE MORTALIDAD		1/4	2/4	3/4	4/4
Irregular (I)	MP	I1	I2	I3	S
Descendente (D)		D1	D2	D3	
Ascendente (A)		A1	A2	A3	
Lateral (L)		L1	L2		

S= Saludable  
MP= Muerto en Pie

Figura 7: Escala de Porcentaje de Retención de Copa de la SARH (1984)

Tomando como base la investigación de Keen (1943) sobre la escala de vigor de copa

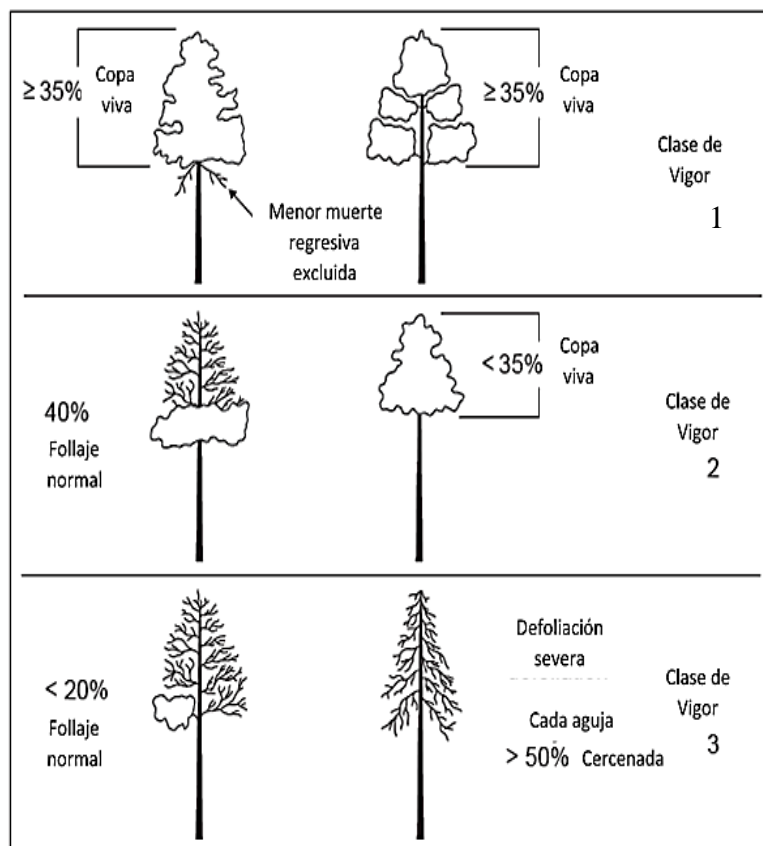


Figura 8: Escala de daño de copa de la USDA (1990)

(PiPo), los investigadores derivaron un programa “*Condición de la copa. Clasificación: una guía a la recopilación de datos y análisis*” para evaluar la condición de los bosques de los EE UU; la USDA elaboró la escala estandarizada para el registro del daño por ozono y contaminantes del aire (figura 8). El método de determinación se basa en que “mentalmente, la copa se divida en cuatro cuartos verticales (caras)

y la parte superior (cinco secciones

en total)”. Se observa la proporción de copa viva no compactada de cada uno de los cuatro cuartos verticales, se registra una tasa de copa viva sin compactar de 35% o más y se cuenta como si recibiera la totalidad de la luz. Los árboles con una proporción total de copa viva no compactada ( $< 35\%$ ) pueden tener un índice máximo de exposición de 1 (si la parte superior tiene exposición al sol). Una sección del árbol (en un cuarto vertical) debe tener al menos un 35% de follaje con hojas expuestas al sol, para que cuente como recibiendo luz completa. La parte superior de la copa no necesita recibir luz en su totalidad, si alguna porción de la parte superior de la copa recibe luz, califica. Al final, se suma el número total de secciones expuestas a la luz completa y se registra el número apropiado.

### 2.3.1 Arquitectura de la copa

Schomaker et al. (2007) publicó que las dimensiones de las copas (figura 9) corresponden con su capacidad de convertir la radiación solar en los fotosintatos, requeridos en el crecimiento,



**Figura 9: Copa cónica cuya base de la copa (comienzan a 1.60 m sobre el nivel del suelo y rebasa los 35 m de altura)**

reparación y mantenimiento del árbol. La arquitectura de la copa la dividen en ocho indicadores (cuadro 2, Anexo 2) implementados por el Servicio Forestal de EE. UU. en el Programa de Monitoreo de Salud Forestal entre 1990 y 1999, los cuales a su vez definen el estado de salud en el que se encuentran las mismas. La estructura de la copa (dosel) del bosque proporciona varios de los servicios de los ecosistemas: interceptar y contribuir a la filtración (60-90%) del agua de lluvia y el depósito suave de granizo o nieve en el suelo y a escala región, promueven la formación de cuencas

hidrológicas de una región. Proporciona agua limpia a personas y animales. Produce biomasa (hojas, ramas caídas, troncos) que mantiene la fertilidad y los bancos de carbono del suelo.

Proporcionar un dosel o cobertura del suelo que proteja el suelo de la fuerza de la lluvia y una estera de raíces que sostenga la tierra para conservarla. Las copas de los bosques retienen gran parte del agua que los árboles absorben y la recirculan a la atmósfera. A través de la transpiración, proporcionando entrada para la lluvia, por lo que se mantiene el ciclo del agua.

**Cuadro 2: Indicadores de la arquitectura de la copa**

<b>Indicador</b>	<b>Definición</b>
<b>Clase de vigor</b>	Es una evaluación visual entre árboles jóvenes con copas en buenas condiciones y árboles jóvenes con copas pobres
<b>Radio de la copa viva no compactada</b>	Es la longitud de la copa que soporta el follaje en relación con la longitud total del árbol desde el suelo
<b>Exposición a la luz de la copa</b>	Cantidad de luz solar directa que recibe la copa viva
<b>Posición de la copa</b>	Indica la posición de la copa de un individuo en relación con las copas del rodal circundante
<b>Densidad de la copa</b>	“Proporción del volumen de la copa que contiene biomasa (follaje, ramas y estructuras reproductivas)” de la superficie, que bloquean la penetración de la luz a través de la copa
<b>Muerte regresiva de la copa</b>	Proporción de la copa con mortalidad reciente en las partes superiores y externas del árbol, que avanza hacia el tronco
<b>Transparencia del follaje</b>	Partes de la copa viva por donde entra luz, debido a ausencia de follaje
<b>Diámetro de la copa</b>	Es el promedio de la distancia de las ramas vivas más externas del contorno de la copa y la distancia perpendicular a esta, es necesaria para calcular el volumen de copa y la biomasa.

## 2.4 Vitalidad y vigor arbóreos

De acuerdo con Dobbertin (2005) es importante conocer el efecto del estrés externo para conocer la vitalidad de los árboles, pues la resistencia al estrés es un criterio importante en todos los conceptos de vitalidad (cuadro 3). Para otros autores la retención de hasta 6 ramillas a lo largo de la rama que deriva del tronco (De la Isla, 2002). En campo se observó que las hojas de las ramas primarias y secundarias se desprenden con facilidad similar a recambio de hojas en todo el árbol. La presente investigación se suma a la definición de *vitalidad de los árboles* con base en lo descrito por Salas & Sánchez (2016), que es “la condición de copa, tomando en cuenta el porcentaje de retención de copa y el patrón de mortalidad (descendente, ascendente y lateral)” y el vigor que es la capacidad genética que tienen para crecer y resistir al estrés (Lilly, 2001; en Martínez et al., 2013).

En la ruta bioquímica expresada por De Vries (2000) establece un conjunto de procesos por los cuales se parte de la emisión de contaminantes del aire que originan los fenómenos de

depósito ácido y exposición de gases corrosivos. Dichos elementos químicos inciden en diferentes procesos catabólicos y anabólicos del ecosistema, ejerciendo sus modificaciones químicas en procesos biológicos como la actividad micorrízica, pero también, alterando la química del suelo y la fisiología celular del árbol, escalado a nivel de ecosistema.

**Cuadro 3: Conceptos de vitalidad**

Autor y año	Definición
<b>Random House Webster's College Dictionary, 1992</b>	"Capacidad de supervivencia, el poder de vivir o crecer"
<b>American Heritage College Dictionary, 1993</b>	"Capacidad de vivir, crecer o desarrollarse"
<b>Merriam-Webster's Collegiate Dictionary, 1994</b>	"Capacidad de vivir y desarrollarse"
<b>Shigo, 1990</b>	* <b>Vigor</b> "la capacidad de resistir la tensión; un factor genético, una fuerza potencial contra cualquier amenaza para sobrevivir" (no se puede cambiar). * <b>Vitalidad</b> "la capacidad de crecer en las condiciones presentes" (acción dinámica).
<b>Brang, 1998</b>	"Capacidad de un organismo para asimilar el carbono, resistir el estrés, adaptarse a las condiciones ambientales cambiantes y reproducirse"
<b>Gehrig, 2004</b>	"Un triángulo entre tolerancia al estrés, longevidad y, crecimiento y reproducción"
<b>Febles Patrón, 2004</b>	* <b>Vigor</b> "la fuerza o capacidad genética de un organismo para resistir tensión". * <b>Vitalidad</b> "la habilidad o eficacia del organismo para crecer bajo ciertas condiciones ambientales, está determinada por factores genéticos y ambientales y es visible en su arquitectura".
<b>Dictionary MAIN PAGE Text &amp; Grap, 2007</b>	* <b>Vigor:</b> capacidad del árbol para sobrevivir al estrés ambiental, se mide aplicando un factor estresante (p.e. sequía) y registrar la respuesta. El vigor es la capacidad de sobrevivir bajo estímulos crecientes que amenaza su supervivencia. El vigor deriva de la genética. Los árboles que se compartimentan de manera más eficaz que otros, son más vigorosos que los que se no se compartimentan profusamente (no pueden aislar la infección viral o bacteriana). Es una habilidad desarrollada en los árboles, es dinámica, por que espera el agente abiótico estresante, los que se mantienen vivos son los que tienen más vigor. * <b>Vitalidad:</b> capacidad de un árbol para crecer en las condiciones en las que se encuentra. Vitalidad significa crecer, reproducirse y adaptarse al entorno; es una condición dinámica, en la cual un árbol puede tener muy poco vigor, pero mucha vitalidad, y viceversa. A diferencia del vigor, la vitalidad de un árbol se puede aumentar mediante fertilización "adecuada", aireación del suelo o riego "adecuado".

Así el cambio en la nutrición del árbol, la sequía fisiológica, y el daño en el sistema radicular, le provocan al árbol, alteración en el balance hídrico y en la movilidad de los nutrimentos, que, de manera simultánea, el sistema fotosintético deja de producir fotosintatos por



la sequía fisiológica y por el daño producido a los cloroplastos vía estomas atmosfera. El modelo que explica la ruta química del decline (figura 10, De Vries, et. al., 2000) proviene de una recopilación experimentales de casi la mayoría de los países de la unión Europea por más 20 años de investigación.

El decline forestal en tiempo y espacio impacta el ecosistema; **en el suelo**; lixiviación de nutrimentos; **en el aire** los contaminantes atmosféricos ( $O_3$ ,  $SO_x$  y  $NO_x$ ) afecta la fotosíntesis de la flora (lixiviación de nutrientes) y el fenotipo (estructuras reproductivas), la estructura poblacional. El daño cuticular de las hojas, la asignación de carbono, la sequía fisiológica y un sistema radicular debilitado, conlleva al estrés nutrimental y por ende pérdida de vitalidad y vigor, de los árboles, se hacen susceptibles a plagas y el clima, el fenómeno que comienza en un árbol va escalando a la población, comunidad y ecosistema (figura 10).

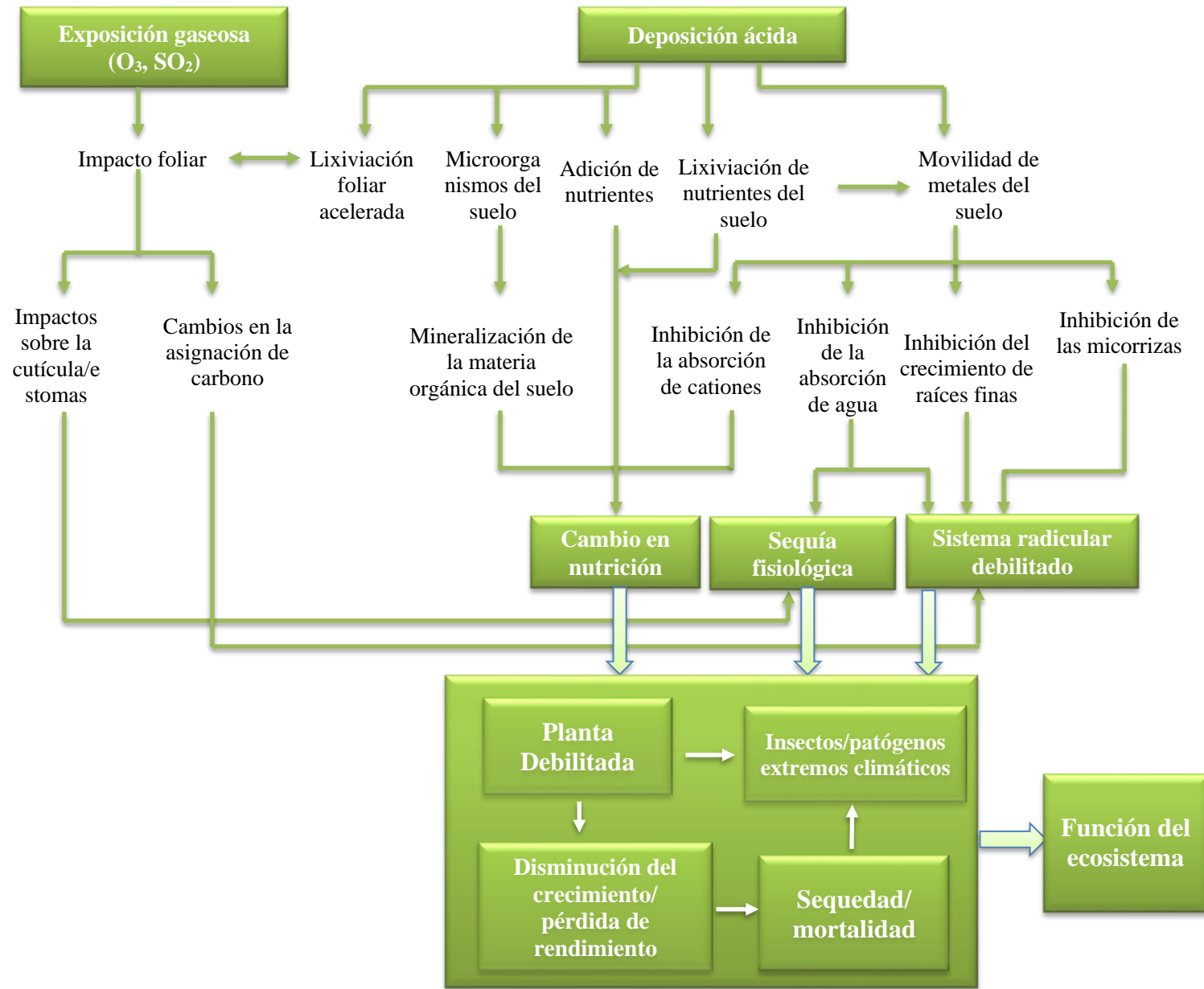


Figura 10: Modelo teórico propuesto para explicar el decline forestal y su efecto en el vigor del bosque (tomado de De Vries et al., 2000)

### 2.4.1 Anillos de crecimiento

Los anillos de crecimiento (figura 11) son capas de células divididas por mitosis, que forman el tallo y las raíces de los árboles, se dividen en dos porciones denominadas “madera temprana” y “madera tardía” (Rincón & Huante, 1989). En las coníferas, generalmente el crecimiento inicia en la primavera, la porción del anillo que se desarrolla durante este período es denominada “madera temprana”, se caracteriza por tener células xilemáticas grandes y de paredes celulares delgadas (verde). La porción denominada “madera tardía” (azul), está formada por células pequeñas y es más densa porque contiene la pared celular interna un revestimiento de lignina, se forma en el verano y se ubica en la parte externa de la capa xilemática (*op cit.*).



Figura 11: Anillos de crecimiento y división de sus componentes

Las variaciones en las características de los anillos anuales (ancho, densidad, estructura celular) reflejan detalles de la historia natural de un individuo, por ejemplo, influencia de factores bióticos y abióticos sobre los árboles (Fritts & Swetnam, 1986; Harper, 1977; en Rincón & Huante, 1989). Las fluctuaciones en el crecimiento de los anillos representan *la sensibilidad del árbol ante los cambios ambientales* que se presentan, varían de acuerdo a la latitud donde se encuentre o se desarrolle (Vogt et al., s. f.).

## 2.5 Fotosíntesis—respiración—crecimiento

Pallardy & Kozlowski, (2008a) definen a la respiración como la oxidación de los alimentos (sustrato) en las células vivas, provocando la liberación de energía, que se almacena como química en las moléculas del sustrato. Los productos de la respiración (metabolitos intermedios) proporcionan esqueletos de carbono, constituyentes celulares. Ambos productos son necesarios para el crecimiento y mantenimiento de los tejidos, la absorción de nutrientes minerales y la translocación de materiales orgánicos e inorgánicos. Se han demostrado fuertes correlaciones entre la respiración y el crecimiento de las plantas leñosas (Anekonda et al., 1993, 1994; en Pallardy & Kozlowski, op cit). La tasa de respiración de brotes y raíces (peso seco) varía sistemáticamente, de tal manera que las especies de crecimiento rápido tienen tasas más altas en comparación con las especies de crecimiento lento (Poorter et al., 1991; en Pallardy & Kozlowski, op cit).

De acuerdo con Wareing (1964) la tasa de crecimiento de un árbol depende de la velocidad con que aumente la superficie foliar, que a su vez depende de la tasa de producción de primordios foliares por los meristemas apicales, la superficie alcanzada por cada hoja y el número de meristemas apicales se determina por el tipo de ramificación de la especie, y en su totalidad determinan la capacidad fotosintética de los árboles. Un factor que habría que sumar y que afecta a la producción anual de materia seca, es la duración de superficie foliar del árbol, que se expresa por el tipo de follaje. Las hojas jóvenes en expansión son el principal lugar de síntesis de auxinas, éstas envían auxinas a las regiones del tronco situadas por debajo, son la fuente de abastecimiento del cambium durante la primavera, ya que la actividad cambial en esta época depende de la presencia de yemas en expansión.

La auxina necesaria para la división cambial durante la formación del leño de otoño parece provenir de las hojas maduras (Wareing, 1964). En este sentido no es común que el



**Figura 12: Perdida del follaje de un rodal de árboles de oyamel**

oyamel pierda todo su follaje como se registró en el paraje Cañada del Quesero, al sur-poniente del Parque Nacional Zoquiapan, Estado de México (figura 12).

La energía (carbohidratos) que se obtiene a través de la respiración es utilizada para

el crecimiento, el

mantenimiento de sus estructuras, el transporte de nutrientes, la regeneración de proteínas y los procesos de reparación (Ribas-Carbó et al., 2008).

De acuerdo con Smith (1981) la variación estacional en precipitación y flujo de energía es el factor que ejerce variaciones en el crecimiento año con año. Las características abióticas; topografía, sustrato natural, componentes del suelo y estructura, como las bióticas; vegetación circundante, competencia en el sitio donde se desarrolla el árbol, juegan un papel de moduladores que pueden ampliar o reducir la contribución de algunos factores limitantes que estimulen o reduzcan el crecimiento.

En la figura 13 se muestra un modelo hipotético que refiere los diferentes procesos implicados en las estructuras del árbol, como población y comunidad arbórea, Smith (1981) jerarquizo (escala celular, metabólica-estructural y población-comunidad) como el efecto de la contaminación del aire en los bosques.

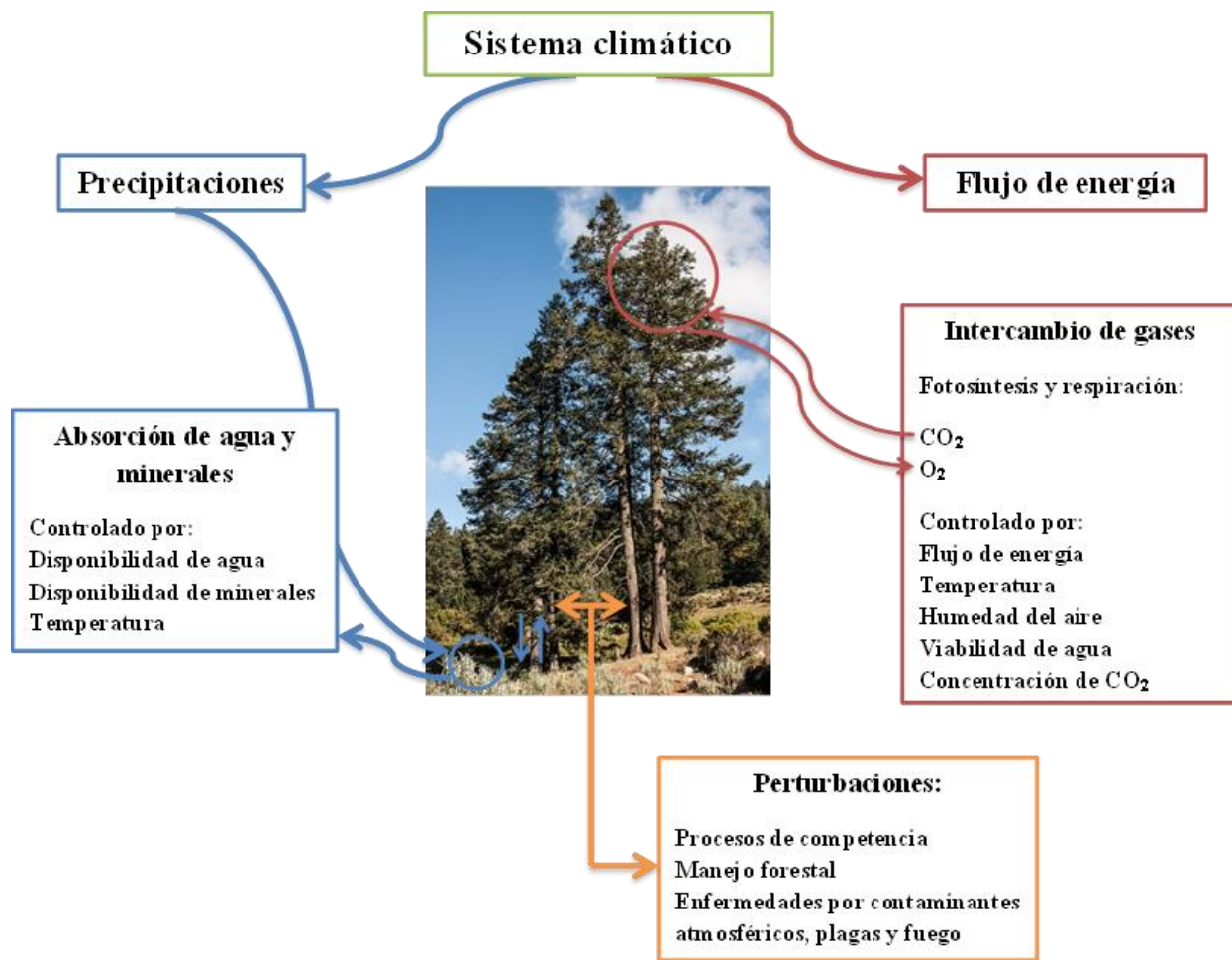


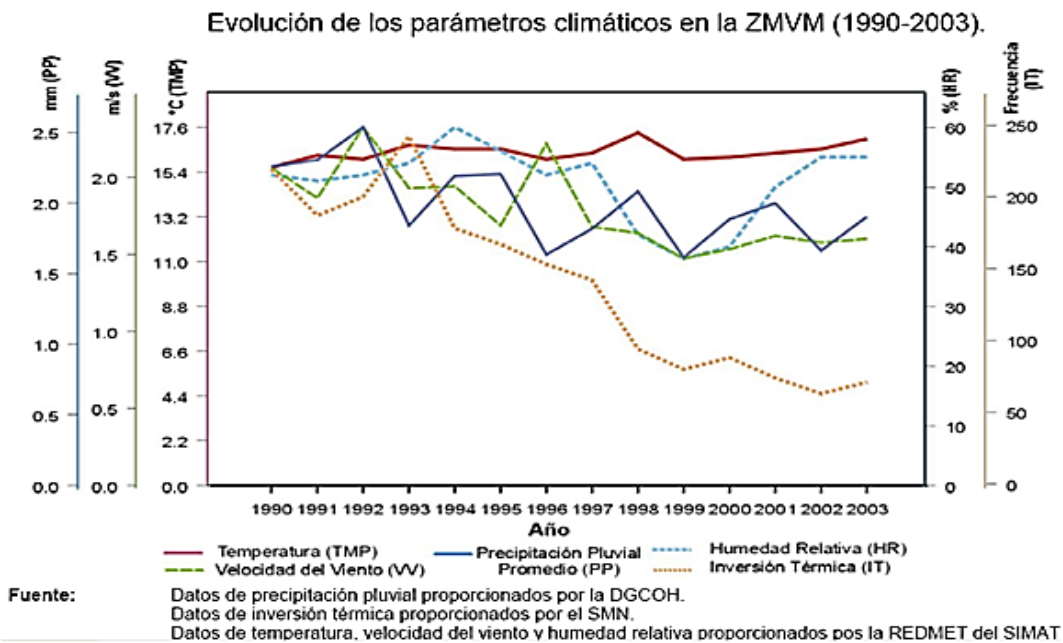
Figura 13: Interacción fotosíntesis-respiración-crecimiento y sus factores limitantes (<http://www.hiilipuu.fi/articles/plant-respiration>)

## 2.6 Efecto de los contaminantes atmosféricos (O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>) sobre la copa de los árboles y su fotosíntesis

Las características fisiográficas del sur de la Ciudad de México y del Valle de México, limitan la circulación (de norte a sur por casi 7 meses) de vientos, reduciéndolos a menos de 1.5 m/s (Legorreta, 1991), los contaminantes no se dispersan y se concentran entre el centro y el sureste-suroeste de la ciudad; por otro lado, la altitud de la ciudad hace poco eficiente la combustión de un automóvil<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Bien afinado un vehículo, combustiona con un 92% de eficiencia, a nivel del mar, pero a la altitud de la Ciudad de México, es de 69%.

En la **figura 14** se representa la conducta histórica (1990—2003) de: *humedad relativa* (HR), *temperatura* (TMP), *precipitación pluvial promedio* (PP), *velocidad del viento* (VV) e *inversiones térmicas* (IT) registradas en la Cuenca del Valle de México. Dichos parámetros son determinantes en el crecimiento celular del árbol, Fritts (1976) propuso un modelo cornológico en relación a T° y PP, que permite evaluar el crecimiento traqueidal y del tronco.



**Figura 14: Régimen climático típico mensual de la Ciudad de México y de la ZMVM (tomado de Herrejón Gómez, 2018)**

En la Cuenca se observa que las inversiones térmicas disminuyen su presencia en 260 días para el año 1993, y de 75 (días/año) en 2003. El estancamiento de los contaminantes en la atmósfera urbana expone por más tiempo la concentración de los gases en los bosques, y por ende baja su productividad.

Pallardy & Kozłowski (2008) hacen referencia que los contaminantes atmosféricos alteran la tasa de fotosíntesis (**cuadro 4**) por diversos mecanismos:

- Obstrucción de los poros estomáticos.



- Alteran las propiedades ópticas de las hojas, cambian la reflectancia y disminuyen la intensidad de la luz que llega al interior de la hoja, en consecuencia, se debe intensificar la producción de pigmentos clorofílicos.
- Inhibición del proceso fotosintético mediante la descomposición de la clorofila, así como la actividad cambiante de las enzimas fijadoras de carbono, la tasa de fosforilación y la capacidad de amortiguación del pH.
- Alteran el balance de calor e inducen cambios en la anatomía de las hojas de las hojas.
- Alteran la integridad de las membranas y la ultraestructura de los orgánulos.

**Cuadro 4: Dosis umbral de ozono (O<sub>3</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) para la supresión de la fotosíntesis de plántulas y plantones de árboles forestales (Tomado de S. G. Pallardy & Kozlowski, 2008)**

Contaminante	Concentración (ppm)	Tiempo	Duración del experimento	Especies
O <sub>3</sub>	0.03	9 h/día	10 días	<i>Pinus ponderosa</i>
	0.015	Continuo	19 días	<i>Pinus strobus</i>
	0.015	Continuo	84 días	<i>Pinus elliottii, Pinus serótina, Pinus taeda</i>
	0.05	4 h	Tratamiento único	<i>Pinus strobus</i>
	0.05	7—11 h	1—2 días	<i>Quercus velutina</i>
	0.05	7—11 h	1—2 días	<i>Acer saccharum</i>
SO <sub>2</sub>	6.6	4—6 h	Tratamiento único	<i>Acer rubrum</i>
	1	2—4 h	Tratamiento único	<i>Populus tremuloides, Fraxinus americana</i>
	0.01	Continuo	2 semanas	<i>Abies alba</i>
	0.02	Continuo	2 semanas	<i>Picea abies, Pinus sylvestris</i>
	1	30 min	Tratamiento único	<i>Acer saccharinum</i> (hojas)
	0.05	7—11 h	1—2 días	<i>Quercus velutina</i>
	0.05	7—11 h	1—2 días	<i>Acer saccharum</i>
	0.05	7—11 h	1—2 días	<i>Fraxinus americana</i>

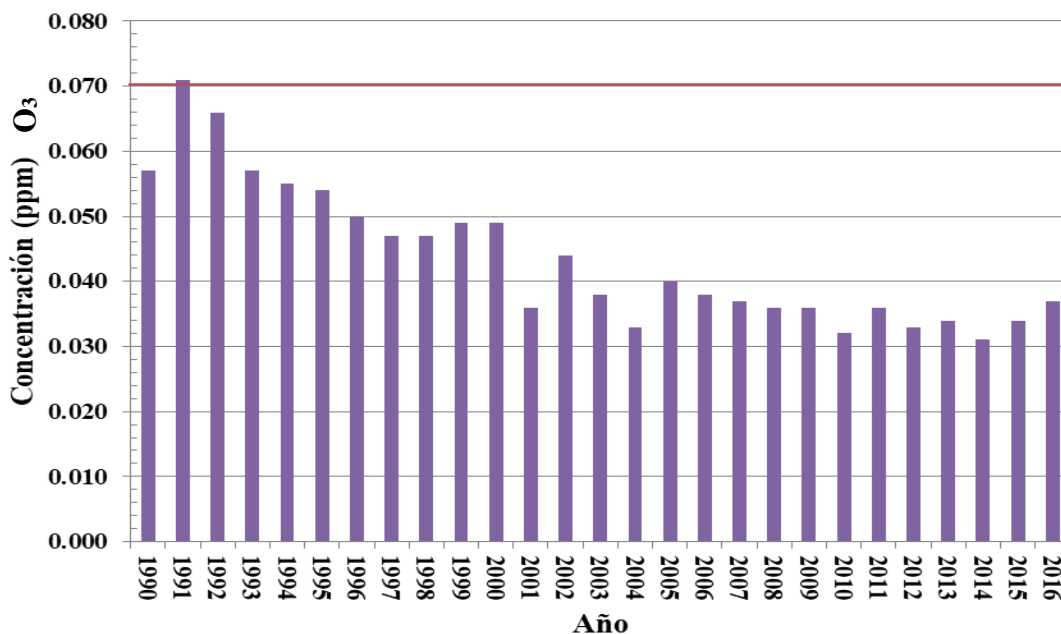
De acuerdo con Rivera et al. (2006) el ozono reduce de clorofilas a y b, y provoca clorosis de las hojas, evolucionando como necrosis en un período máximo de año y medio. Yunus & Iqbal (1996) publicaron que el efecto de SO<sub>2</sub> y los NO<sub>x</sub> en las células de la hoja, destruyen sus estructuras, desintegran las columnas de los tilacoides, la matriz del citoplasma, aglutinan los tilacoides en los plastidos, dañan la mitocondria y reducen el número de ribosomas.



### 2.6.1 Ozono (O<sub>3</sub>)

El producto del ciclo fotoquímico, de los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno, es el ozono -contaminante secundario- (SEMARNAT et al., 2011; en Rivera Hidalgo et al., 2016). En la figura 15 se pueden observar los registros históricos de concentración de ozono en la Ciudad de México, del año 1990 al año 2016, en donde se destaca que antes del año 2000 los registros fueron mayores a 0.05 ppm, sin embargo, solo en el año 1991 se rebasó la norma.

De acuerdo con Matyssek et al. (1995) el ozono reduce la tasa de fotosíntesis debido a que genera una menor capacidad fotosintética máxima, una menor eficiencia de carboxilación y rendimiento cuántico; por otro lado, Sánchez Villanueva (2018) menciona que el ozono no es acumulable, por lo que genera efectos a corto plazo y esto se ve reflejado en la disminución de clorofilas a y b que afectan el procesos de fotosíntesis. Las hojas más sensibles son las más viejas donde la actividad y la cantidad de RuBisCO se reducen, en comparación con hojas de edad similar que no han sido expuestas (Dizengremel, 2001; Rebeck & Loats, 1997). “La RuBisCO activasa también disminuye, así como la clorofila y las enzimas del ciclo de Calvin. El NADPH<sub>2</sub> se desvía a la vía ascorbato peroxidasa-glutation que se asocia con la desintoxicación de O<sub>3</sub>” (S. G. Pallardy & Kozlowski, 2008a).



**Figura 15: Registro de concentración de ozono máximo anual del promedio móvil de 8 horas en la Ciudad de México (1990-2016), el límite máximo permisible de ozono (línea roja=0.070 ppm) de acuerdo con la NOM-020-SSA1-2014. Modificada de Herrejón Gómez (2018)**

Los efectos del ozono a largo plazo son la reducción de la fotosíntesis total de la planta por la disminución de la formación y expansión de las hojas, así como por la necrosis y abscisión (op cit.). También señalan que el O<sub>3</sub> acelera el envejecimiento de las hojas, lo que es en parte responsable de la disminución de la capacidad fotosintética de los árboles. En este sentido los experimentos Reich (1983) y Retzlaff et al. (1991) registraron que las hojas control vivieron entre un 10 y 15% más que las expuestas al O<sub>3</sub>.

Los efectos del O<sub>3</sub> sobre la respiración se han documentado por diversos investigadores, quienes informaron que una concentración baja estimulaba dicho proceso, en ausencia o antes de que ocurriera una lesión visible (S. G. Pallardy & Kozlowski, 2008b). En una investigación de Barnes (1972) se demostró que cuando cuatro especies de **plántulas de pino fueron expuestas a concentraciones de O<sub>3</sub> de 0.050 a 0.150 ppm, aumentaron su respiración hasta en un 90%.**

McLaughlin et al. (1982) también informaron aumentos en la respiración después de la exposición crónica a oxidantes.

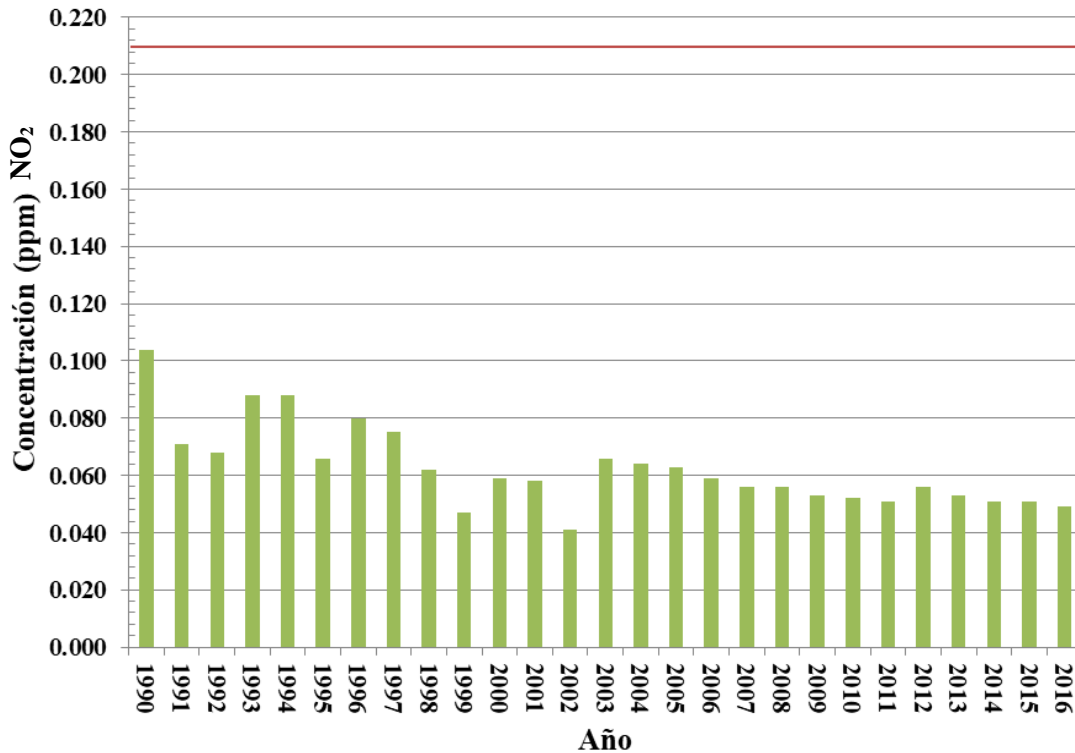
Edwards (1991) advirtió que en plántulas de pino piñonero expuestas al doble de O<sub>3</sub> ambiental, las tasas anuales de respiración de las raíces eran 12% más bajas que en las plántulas expuestas al O<sub>3</sub> subambiente.

El suministro reducido de fotosintato a las raíces de las plantas expuestas a altos niveles de O<sub>3</sub>, pudo estar asociado con las tasas de respiración más bajas. La asignación reducida de fotosintato a las raíces pudo ser una consecuencia de un mayor requerimiento respiratorio para el mantenimiento y la reparación de los tejidos en hojas dañadas por O<sub>3</sub> (Pallardy & Kozlowski, 2008). “Debido a que el O<sub>3</sub> tiene un impacto principal en las hojas al dañar las membranas, se puede esperar un costo respiratorio para la reparación de las células después de un episodio de contaminación” (Amthor, 1989).

### **2.6.2 Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

De acuerdo con Bravo-Alvarez & Torres-Jardón (2002), el óxido nítrico (NO) en su forma tóxica es NO<sub>x</sub> y está en la mayoría de las emisiones producto de la combustión, se oxida, dependiendo del grupo que done el oxígeno (hidrocarburo, aldehidos, cetonas y acidos), ya formado el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) entra al ciclo fotoquímico del O<sub>3</sub>. Las condiciones del clima propician la formación ácido nítrico y partículas de nitrato, según la estación del año podría originar la deposición ácida y aerosoles particulados (PM<sub>10</sub>).

La figura 16 muestra las concentraciones de NO<sub>x</sub> históricas en la Ciudad de México, partiendo del año 1990 al año 2016, se destaca que la norma no se ha alcanzado, sin embargo, las concentraciones de ozono han obligado a tomar acciones por contingencia ambiental.



**Figura 16: Registro de concentración de dióxido de nitrógeno promedio horario en la Ciudad de México (1990-2016), la línea roja indica el límite de concentración máxima de dióxido de nitrógeno de acuerdo con la NOM-023-SSA1-1993 (0.210 ppm). Modificada de Herrejón Gómez (2018)**

En el caso del NO<sub>2</sub> Lorenc-Plucinska (1988) observó que se redujo la fotosíntesis de las progenies de pino escocés inmediatamente después de una **exposición a 0.5, 1.0 y 2.0 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>**, concluyendo que la reducción fue mayor con la dosis más alta. De acuerdo con Pallardy & Kozlowski (2008), existen pocos estudios sobre los efectos del NO<sub>2</sub> en la respiración de las plantas leñosas. Sin embargo, en el trabajo de Srivastava et al. (1975) con plantas herbáceas “mostró que tanto la respiración como la fotorespiración eran inhibidas por el NO<sub>2</sub> y la cantidad de disminución aumentaba con una dosis más alta de NO<sub>2</sub>, temperatura y duración de la exposición”.

### 2.6.3 Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)

El óxido de azufre (SO<sub>x</sub>) se produce por la combustión del gasóleo y diésel, históricamente en la Ciudad de México solo tres años (1990, 1991 y 1992) se ha resbasado la norma hasta llegar a 0.11 ppm (figura 17), de igual manera para 1994, 1995 y 2001, pero muy poco. A partir de 2002 se puede ver un descenso en la concentraciones. Con la lluvia se forman sulfatos, aerosoles ácidos y lluvia ácida (Garza & Aragón, 1995). También el SO<sub>2</sub> puede reaccionar con el O<sub>3</sub> y otros oxidantes fotoquímicos, produciendo trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>) o sulfato (SO<sub>4</sub>) (Bravo-Álvarez & Torres-Jardón 2002).

En dosis altas el SO<sub>2</sub> reduce rápida y sustancialmente la tasa de fotosíntesis, varía de acuerdo con el vigor de cada especie (Keller, 1983), en 1977 Keller aplicó SO<sub>2</sub> a plántulas de *Abies concolor*, *Picea abies* y *Pinus sylvestris*, bajo condiciones controladas, a partir de 10 ppm/h se suprimió la fotosíntesis en *Abies concolor* y 20 ppm/h para el abeto y pino, ambos tratamientos se aplicaron de manera continua durante dos semanas (Pallardy & Kozlowski, 2008).

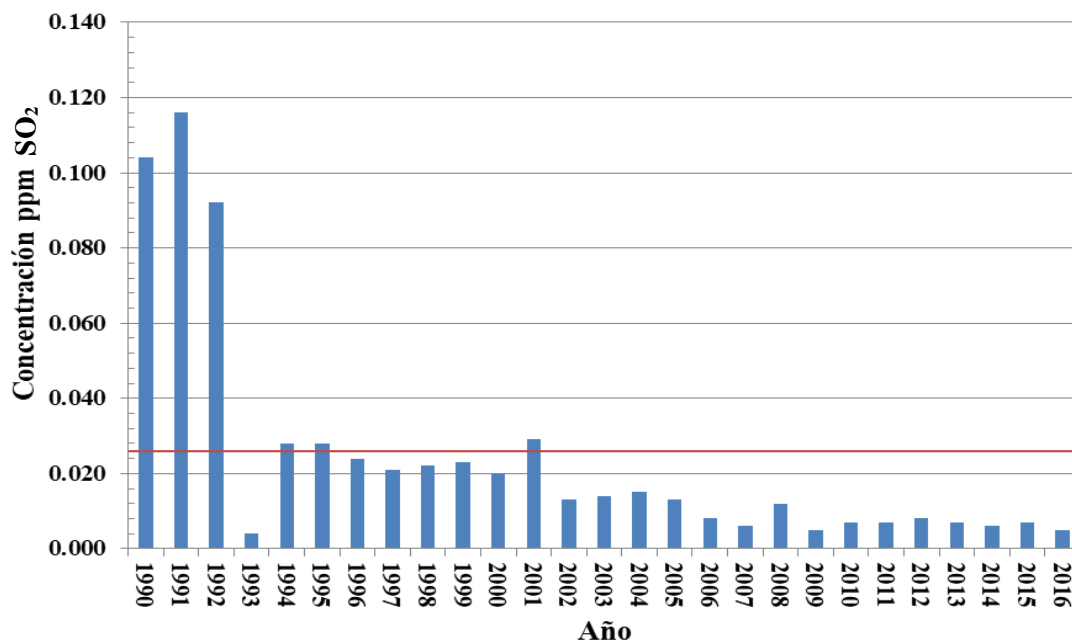


Figura 17: Registro de concentración de dióxido de azufre promedio anual en la Ciudad de México (1990-2016), la concentración máxima permisible de dióxido de azufre (línea roja=0.025 ppm) de acuerdo con la NOM-022-SSA1-2010. Modificada de Herrejón Gómez (2018)

### 3. ANTECEDENTES

En Polonia, Eslovenia, Rumania, Ucrania República Checa, se eligieron sitios con alta y baja contaminación (Muzikaa et al., 2004) se registraron las cronologías de *Picea abies* y *Fagus sylvatica*, y el ancho de anillo, estimación de crecimiento de los árboles, y con ello la posible relación con O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Un efecto combinado de O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se correlacionó negativamente con el crecimiento de *Picea abies* y *Fagus sylvatica*. Las cronologías mostraron una tendencia de disminución en los sitios de "alta" contaminación en relación con el sitio de "baja" contaminación. En los sitios más fuertemente contaminados, el BAI de *Fagus sylvatica* disminuyó en un 50% y *Picea abies* en un 20% durante los últimos 45 años. Los niveles medios de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> (1997—1999) se relacionaron inversamente con el índice medio basal (BAI).

En Europa central, Escandinavia y al sur europeo llegando a España se registró un daño en los bosques, la hipótesis propuesta fue que los “factores estresantes” eran: la química del suelo, temperatura, clima, sequía y contaminación del aire (concentración y depósito de SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>x</sub> y O<sub>3</sub>), se monitoreo los patrones de distribución espacial de la defoliación de los árboles y del crecimiento (área basal) del bosque durante 1986—1995, estableciendo una relación inversa.

En la unión Europea se reunió un copioso número de estudios sobre el decline forestal (Klap et al., 2000; van Leeuwen et al., 2000; De Vries, et al., 2000 a y b) del cual se determinó que los factores del daño de las copas arbóreas eran fisiológicos, con lo cual elaboraron patrones de daño, transparencia y vitalidad de copa, clorosis y su relación ecológica.

La vitalidad de los árboles “*refiere la condición de la copa, considerando el porcentaje de retención y el patrón de mortalidad*”, y el vigor de los árboles es considerado como “*la*

*capacidad genética*” para resistir condiciones del ambiente (Salas & Sánchez, 2016) y que les permite crecer y resistir al estrés (Lilly, 2001; en Martínez et al., 2013).

Los síntomas de decline en Bosques de la Cuenca de México, fueron reportados por Ciesla & Macías-Sámamo (1987); con la hipótesis de las altas concentraciones de O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y HC, lo cual generaba daños en árboles de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, en el Parque Nacional del Desierto de los Leones (PNDL), así mismo surgieron más estudios (de Bauer et al., 1985; Alvarado-Rosales, 1989; Cibrián-Tovar, 1989; Alvarado R. et al., 1993; Alvarez-Camarena, 1996; Alarcón et al., 1993 y Fenn et al., 1999). En el cuadro 5 se muestran algunas investigaciones respecto a la relación de la vitalidad de los árboles con su vigor.

**Cuadro 5: Estudios de la relación entre la vitalidad de los árboles con su vigor**

Autor y año	Conclusiones
<b>Kuuluvainen, 1988</b>	Concluyó que los árboles de <i>Picea abies</i> de copa estrecha y larga, tenían mayor vitalidad y densidad, por lo que la producción de madera fue mayor, diferente a árboles de copa ancha.
<b>Alvarado R. et al., 1993</b>	Detectaron un decremento drástico en el ancho de anillo en cerca de 100 árboles enfermos (menor vitalidad) de <i>Abies religiosa</i> .
<b>Zarnoch et al., 1994</b>	Concluyeron que los árboles de <i>Pinus echinata</i> Mill. con copa de vigor pobre tuvieron una disminución en sus anillos de crecimiento, a diferencia de los árboles con mejor vigor.
<b>Dwyer et al., 1995</b>	Concluyeron que <i>Quercus velutina</i> y <i>Quercus cocinea</i> , con muerte de copa >30% tuvieron tasas de crecimiento más bajas, en comparación con árboles con muerte de copa <30%.
<b>Acosta-Montoya, 1998</b>	Concluyó que las concentraciones de contaminantes atmosféricos como el O <sub>3</sub> incrementan la senescencia foliar y esto a su vez reduce la biomasa del tronco de los árboles de <i>Abies religiosa</i> , creciendo en condiciones ambientales naturales en el PNDL.
<b>Bernal-Salazar et al., 2002</b>	Concluyeron que la disminución del crecimiento de <i>Abies religiosa</i> del PNDL, puede estar asociada con la reducción del área foliar que tenían la mayoría de individuos evaluados.
<b>Duchesne et al., 2003</b>	Detectaron un incremento de área basal mayor en árboles con copas menos declinadas (<25%), a diferencia de copas con decline mayor al 25%.
<b>Bigler et al., 2004</b>	Concluyeron que los patrones de crecimiento en árboles muertos y en decline fueron muy bajos y con tendencias negativas. Los árboles sanos, por el contrario, mostraron niveles de crecimiento significativamente más altos y tendencias de crecimiento positivas.
<b>Jurkonis et al., 2006</b>	Concluyeron que la probabilidad de mortalidad fue alta en árboles de <i>Pinus sylvestris</i> con menor incremento en diámetro y poca defoliación de copa, a diferencia de árboles con tasas de crecimiento altas, pero que fueron incrementando su nivel de defoliación.
<b>Drobyshev et al., 2007</b>	Determinaron que los árboles de <i>Quercus robur</i> con copas sanas incrementaron su crecimiento, los de copas moderadamente declinadas mantuvieron su crecimiento uniforme y los de copas severamente declinadas tuvieron un descenso en su crecimiento.

Autor y año	Conclusiones
<b>Manzano-Méndez et al., 2010</b>	Concluyeron que los mayores crecimientos diamétricos anuales para <i>Zanthoxylum kelemanii</i> se registraron en individuos con copas simétricas y vigorosas.
<b>Camarero et al., 2012</b>	Concluyeron que durante condiciones de sequía los individuos menos frondosos de <i>A. alba</i> y <i>P. halepensis</i> respondieron menos vigorosamente al crecimiento de anillos, a diferencia de períodos donde hubo condiciones climáticas benignas; en el caso de <i>P. halepensis</i> , los árboles defoliados, fueron capaces de sobrevivir sin formar anillos de crecimiento.
<b>Pineda-Herrera et al., 2015</b>	En <i>Hura poliandra</i> , determinaron que los árboles con mejor iluminación de copa presentaron mayor incremento en diámetro respecto a los que tuvieron menor iluminación.
<b>Matisons et al., 2016</b>	Concluyeron que en árboles con copa dañada de <i>Fraxinus excelsior</i> , hubo mayor susceptibilidad a factores ambientales como el cambio extremo de temperatura, lo que generó una alta variabilidad en su crecimiento, a diferencia de los árboles con copas sanas.

Bernal-Salazar & Terrazas (en Fenn et al., 2002) reportaron que la tendencia del ancho de anillos soportaba la hipótesis de que la alta contaminación atmosférica (1981 a 1990) reduce el crecimiento en relación a décadas previas. En otro contexto Alarcón (1993) citado por Fenn et al. (op cit) determinó que la variación del ancho de los anillos durante la década de 1920-1990 oscilo entre 0.2—0.7 mm de ancho y concluyeron que este tipo de estudios contribuirán a entender la relación entre la vitalidad de copa y el transporte de fotosintatos del tronco del oyamel.

Debido a esta problemática, en la Cuenca de México y en específico en los parques nacionales del área del suelo de conservación de la Ciudad de México se realizó el diseño de seleccionar copas con diferentes categorías de retención y medir sus anillos de crecimiento.



## 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento industrial y demográfico en la Ciudad de México, comenzó en 1940 hasta la fecha con casi 6.4 millones de vehículos, han contribuido a un enrarecimiento de la atmósfera urbana (Legorreta, 1991). Durante esos 80 años hay altas y bajas en la calidad del aire (línea del tiempo, pág. 58) con su correspondiente impacto en 95 mil hectáreas de bosque que rodean la ciudad.

Hay dos parques nacionales en el área de suelo de conservación que tienen relevancia por su superficie que permiten la infiltración del agua para consumo de 10.8 millones de habitantes. El Desierto de los Leones (PNDL) es el bosque que más registra decline de oyamel (*Abies religiosa*) como así lo refieren las investigaciones de Alvarado-Rosales et al. (1987), Ciesla & Macías-Sámamo (1987), Alvarado R. et al. (1993), Álvarez-Camarena (1996), Acosta-Montoya (1998); Bernal-Salazar & Terrazas-Salgado, (2000, 2002) en donde se reporta una alta mortalidad de oyamel, se propuso que la clorosis por el efecto del ozono, alteración nutricional de la parte aérea y del suelo (López-López, 1997), podrían ser la causa del decline del tipo en espiral (Alvarado-Rosales & Hernández-Tejeda, 2002).

Desde 1980 se ha reportado el daño clorótico por efecto de ozono (Alvarado-Rosales et al. 1987; Ciesla & Macías-Sámamo, 1987) a través del registro visual, y de la disminución de clorofila en acículas de *Abies religiosa* por Sánchez Villanueva (2018). La exposición a largo plazo (daño crónico) por O<sub>3</sub>, podría disminuir el crecimiento de anillos por efecto del déficit en la producción de carbohidratos. Lo anterior se respalda con los resultados de Jiménez López (2019) quien concluyó que el oyamel del PNDL está en un decaimiento medio, ya que las paredes traqueíales y los anchos de los anillos indican una disminución significativa durante las décadas de mayor contaminación por O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, coincidiendo con Bernal-Salazar & Terrazas (2002). Considerando las evidencias descritas, se planteó la siguiente pregunta:

*¿El crecimiento de *Abies religiosa* depende del estado de salud de la copa?*

## 5. JUSTIFICACIÓN

La Ciudad de México por sus altos niveles de contaminación atmosférica, los contaminantes provienen en su mayoría de la quema de combustibles fósiles, principalmente en fábricas, automóviles y hogares. Entre los principales contaminantes que afectan la calidad del aire de la Ciudad y su Zona Metropolitana, se reportó para el año 2017 el ozono ( $O_3=140$  ppb/8 h en la ZMVM y CDMX, y 119 ppb/8h en el Área conurbada (EdoMéx)), la emisión de partículas suspendidas ( $PM_{10}=70.3$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  al año para la ZMVM y el Área conurbada (EdoMéx), y 50.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  al año para la CDMX) y ( $PM_{2.5}=29.5$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  al año para la ZMVM y el Área conurbada (EdoMéx), y 23.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  al año para la CDMX) de acuerdo con Jaimes Palomera & Rivera Hernández (2018).

Debido a que el PNDL se encuentra adyacente a la zona urbana de la CDMX y al suroeste de esta, recibe los vientos que provienen del este y sureste de la ZMVM, lo que conlleva a su vez, que el arbolado que se encuentra ahí absorba todos los contaminantes atmosféricos que llevan consigo los vientos, afectando la salud del bosque. De acuerdo con Martínez Cruz (2005) dicho parque brinda diversos servicios ecosistémicos (captura de carbono, servicios hidrológicos, regulación de temperatura, conservación de flora y fauna, entre otros), por lo que es importante el monitoreo constante de la salud forestal que presenta.

Actualmente se cuenta con escasa información que contribuya al conocimiento de la salud forestal en bosques de la CDMX. En lo que respecta a la relación entre el estado de salud del dosel (afectado por efecto de los contaminantes del aire) y el crecimiento de anillos de *Abies religiosa*, en México la información es escasa y no está actualizada.

## 6. HIPÓTESIS

El cambium se divide formando células que se diferencian en aquellas que formaran el floema, creciendo hacia el exterior y las células originales formaran el xilema al interior del tronco; es por ello que el daño en copa afecta el aumento de filas celulares, lo que se traduce como un disminución del grosor del anillo Cook & Kairiukstis (1992) y Ferguson (1970). Derivado de lo anterior se propone:

*Si la vitalidad de los árboles expresada por la retención de copa (salud forestal) es óptima (100%) y (75%), entonces los árboles que tengan menor a lo óptimo (50%) y (25%), tendrán poca ganancia en los anillos de crecimiento.*

## 7. OBJETIVOS

### Objetivo general

Establecer la posible relación entre las categorías de retención de copa y el grosor de los anillos de crecimiento de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham, con el fundamento de que la copa abastece los carbohidratos para el crecimiento del árbol.

### Objetivos particulares

- Conocer la **cronología total** del oyamel determinando su conducta en el tiempo (**1866 a 2016**) y relacionarlo con eventos atmosféricos de la CDMX.
- Determinar las cronologías de los árboles con retención de copa del 25%, 50%, 75% y 100% (grados de declinación).
- Determinar el promedio de ancho de anillo en cada categoría de copa y vincularlo a eventos de contaminación atmosférica de la CDMX.
- Establecer la ganancia de crecimiento para cada una de las categorías de retención de copa.
- Determinar el índice de sensibilidad de la especie para conocer la susceptibilidad.
- Determinar la retención de copa necesaria para que el oyamel no caiga en declive.

## **8. ÁREA DE ESTUDIO**

### **8.1 Descripción de la zona de estudio**

Vargas Márquez (1997) reporto para El Desierto de los Leones, la problemática que presenta: plagas forestales, vigentes y cubriendo más área forestal hasta la fecha (los saneamientos forestales de 1983 a 1987 no contuvieron la infesta), los aclareos y las especies de pino afectadas, entre ellas, la población de oyamel.

Las zonas con presencia de hongos (enfermedad forestal que causa amarillamiento en las hojas), insectos y con cantidades considerables de muérdago han aumentado de acuerdo con Alvarado-Rosales et al., (2007).

El mismo autor refiere que el parque está afectado por la contaminación atmosférica; Cantoral Herrera (1986) comprobó con comunidades líquénicas epífitas (indicadores de contaminación atmosférica en *Abies religiosa*) que la contaminación atmosférica está debilitando el bosque. Por efecto de lluvia ácida, se afectan las principales especies forestales del parque (Arce Alarcón & García Hernández, 1990). Aunado al pastoreo dentro del parque; aunque es mínimo, no debería existir, ya que son terrenos nacionales, que ya fueron indemnizados, sin embargo, su administración ha llevado a extremos en las fuerzas políticas de la alcaldía de Cuajimalpa y Magdalena Contreras; el crecimiento demográfico no se ha podido detener.

#### **8.1.1 Localización geográfica**

El Parque Nacional Desierto de los Leones se localiza entre las coordenadas geográficas 19° 15' 20" y 19° 19' 40" latitud norte y 99° 17' 40" y 99° 19' 40" longitud oeste (Vargas Márquez, 1997) cuenta con una superficie de 1,866 ha y se ubica en la región central del país, al suroeste de la Cuenca de México. El perfil orográfico va de una altitud de 2,700 a 3,790 m s.n.m. (CONANP, 2006). El parque queda enclavado en la cuenca de captación del Río San Borja y

Arroyo Santo Desierto (Melo Gallegos, 1979 citado en Vargas Márquez, 1997). El trabajo se realizó en el paraje “El Pantano” con las coordenadas geográficas 19° 18’ 05” latitud norte y 99° 19’ 20” longitud oeste, y una altitud de 2,937 m s.n.m. (figura 18).

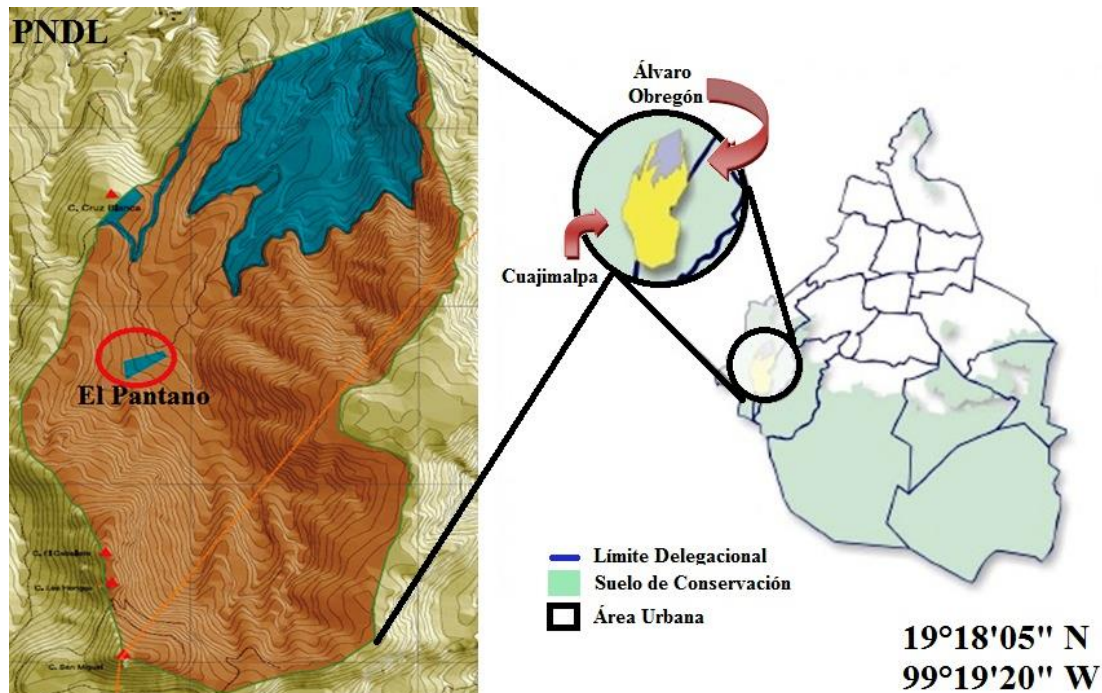


Figura 18: Mapa de ubicación del Parque Nacional Desierto de los Leones, donde se muestra el paraje “El Pantano” (Modificado de CONANP, 2006)

### 8.1.2 Clima

En un rango altitudinal de 2,450 a 2,800 m s.n.m., tiene un clima templado subhúmedo con lluvias en verano (960 mm) y una precipitación invernal menor al 5% (UAM & PAOT, 2010). De los 2,800 a los 3,600 m s.n.m., el clima es del tipo semifrío subhúmedo con lluvias en verano (1200 mm), con una precipitación invernal menor a 5% (*op cit.*).

### 8.1.3 Suelo

De acuerdo con CONANP (2006) en la totalidad del parque el tipo de suelo está clasificado como podzólico, son suelos de origen volcánico, profundos, bien drenados y fértiles, húmedos la mayor parte del año, sus valores de pH son ligeramente ácidos y sus texturas son, de acuerdo con Alcocer y colaboradores (1984) en Vargas Márquez (1997) arcillosa-limosa, arenoso-arcillosa y arenoso-limosa. La erosión encontrada en el paraje de muestreo fue de ligera a moderada.

Reyes (1986) citado en Vargas Márquez (1997), registran suelos profundos, ricos en materia orgánica y húmedos todo el año, en los sitios ocupados por bosque de oyamel, es decir, por debajo de los 3,600 m s.n.m.; el suelo se torna poco profundo, pedregoso y menos húmedo por encima de este nivel, donde se encuentran otro tipo de comunidades como el pastizal y el bosque de *Pinus hartwegii*.

### 8.1.4 Vegetación—Fauna

El bosque de coníferas, representado por comunidades de *Abies religiosa* puras o mezcladas y de *Pinus hartwegii*, es predominante. Los tipos de vegetación determinados con base en la clasificación de Rzedowski (1978) para el Desierto de los Leones son los siguientes de acuerdo con CONANP (2006):

La primera comunidad (bosque de *Abies-Pinus-Quercus*) se establece desde los 2,800 a los 3,000 metros de altitud; corresponde a la zona norte del parque y comprende la mayor parte de su área, las especies *Abies religiosa* y *Pinus patula* son las predominantes en el estrato arbóreo alto; diferentes especies de *Quercus*, *Garrya laurifolia*, *Salix* spp., *Senecio angulifolius* y *S. barba-johannis* se encuentran en esta comunidad, representando a los estratos medio y bajo.

La segunda comunidad (bosque de *Abies religiosa*, figura 19) se localiza por arriba de los 3,000 metros de altitud, en la parte central del parque, sobre laderas de cerros o cañadas protegidas contra la acción de los vientos fuertes y la intensa radiación solar, la especie dominante es *Abies religiosa*. El estrato arbóreo bajo está representado por *Garrya laurifolia*, *Salix paradoxa* y *Buddleia cordata*; *Baccharis conferta*, *Senecio angulifolius*, *S. platanifolius* y *S. barba-johannis*, representan el estrato arbustivo; el estrato herbáceo contiene a las especies *Acaena elongata*, *Sigesbeckia jorullensis* y *Alchemilla procumbens*.

En 1998 un área del parque fue afectada por un siniestro, corresponde al bosque de *Abies religiosa* perturbado por incendio, esta era la especie que dominaba dicha área, como consecuencia de la sucesión natural, la vegetación que representa este lugar es *Senecio cinerarioides* y en algunos sitios *Lupinus* spp. junto con *Ribes ciliatum*, *Baccharis conferta*, *Penstemon gentianoides*, gramíneas de diferentes especies y gran cantidad de herbáceas.

A partir de los 3,600 metros de altitud, se encuentra la comunidad de *Pinus hartwegii*, el estrato bajo está representado por *Muhlenbergia* spp., *Festuca* spp., *Calamagrostis tolucensis*, *Lupinus* spp. y *Penstemon gentianoides*, también se observan arbustos como *Senecio cinerarioides* y *S. salignus*.

Entre los 3,700 metros y el techo altitudinal, se distinguen pequeños manchones de pastizal, donde dominan las especies *Muhlenbergia macorura* y *Festuca tolucensis*, hacia la parte sur del parque se distinguen pequeños manchones de *Quercus* spp. (Freyermunth, 1952; Sosa, 1952). En los años 1998 (350 hectáreas), 2004 y 2009 se registraron incendios que mermaron la población de encinos, pinos y pastizal. En estos bosques el venado “cola blanca” (*Odocoileus virginianus mexicanus*) es representativo (Erskine, 1840; Valdés, 1983; en INECC, 2007). Tres especies de mamíferos fueron detectados por rastros u observaciones (*Sciurus aureogaster*, *Odocoiles virginianus* y *Bassariscus astutus*), el tlacuache (*Dideplphis marsupialis*), el conejo



(*Sylvilagus floridans*), la tuza (*Papogeomys merriami*), el mapache (*Procyon lotor*), el coyote (*Canis latrans*) y la zorra gris (*Urocyon cinereoargenteus*), también se han reportado en el parque. Las especies que mejor representan a las aves son *Cyanocitta stellari* y *Turdus migratorius*.



**Figura 19: Parque Nacional Desierto de los Leones (Lab. Cont. Atm. FES Zaragoza, 2017)**

Con respecto al venado “cola blanca”, Alanis Méndez et al. (1980) estimaron para el otoño de 1980 una densidad de 30.2 venados/km<sup>2</sup> en el PNDL, Alatorre et. al. (1981) citados en INECC (2007) una densidad de 12.0 venados/km<sup>2</sup> en la primavera de 1981 y Dorantes et al. (1981) y Mandujano & Hernández (1990) para verano del mismo año estimaron 12.8 venados/km<sup>2</sup>. Un depredador que se considera el más importante dentro del parque es el perro feral *Canis familiaris*.

En el cuadro 6 se describe la caracterización de la vegetación en el paraje de muestreo.

**Cuadro 6: Caracterización de la vegetación del paraje “El Pantano” (datos recabados en campo)**

<b>Tipo de estratificación de la vegetación</b>	Múltiple
<b>Daño en árboles</b>	Ocoteado, podrido, cinchado, plagado, resinado, presencia de tocones, derribado y muerto en pie
<b>Cobertura (%) gimnospermas</b>	70% <i>Abies religiosa</i> 30% <i>Pinus</i> sp.
<b>Cobertura vegetal (%)</b>	Arbóreo 90% <span style="float: right;">Arbustivo 5%</span> <span style="display: block; text-align: right;">Herbáceo 5%</span>
<b>Competencia interespecífica</b>	Luz y espacio
<b>Geoformas</b>	Pie de monte y ladera

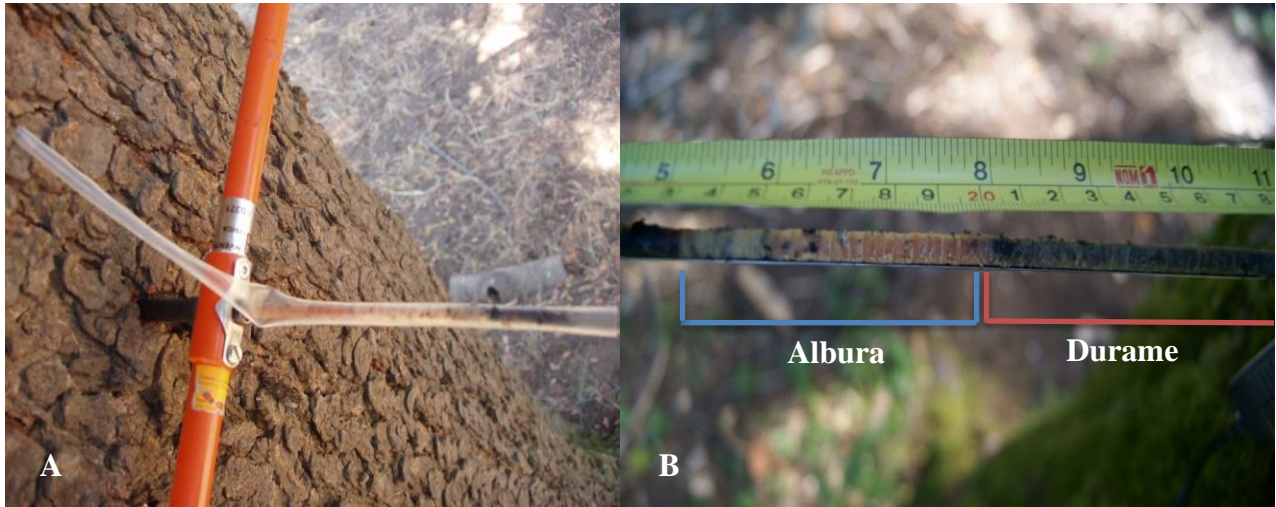
## 9. MÉTODO

### 9.1 Trabajo en campo

Se eligió un biotopo dentro del parque, enclavado entre el exconvento y los estanques de cultivo de trucha. Sobre la carretera corta fuegos con rumbo al paraje “Cruz Blanca”, en el rodal “El Pantano” se realizaron dos muestreos dirigidos, uno en octubre de 2016 y otro febrero de 2017, de acuerdo a lo expresado por Cook & Kairiukstis (1992) para la elección de sitios, rodales y árboles. Se realizó la caracterización ecológica del sitio de acuerdo a lo descrito por Siebe et al., (1996), anotando vegetación, geoformas y espacio geográfico del paraje muestreado.

Se seleccionaron 24 árboles de la especie *A. religiosa*, por ser vulnerable a los contaminantes del aire y una de las más estudiadas; con el criterio de “proporción de copa viva no compactada” (Schomaker et al., 2007) y utilizando la escala (Anexo 3) de porcentaje de retención de copa (SARH, 1984), cuyos porcentajes están divididos en 25%, 50%, 75% y 100%.

De acuerdo con Grissino-Mayer (2003) y Fritts (1976), de cada árbol seleccionado se obtuvo la altura, el diámetro basal y normal de forma simultánea; con una barrena Pressler de 17” de largo se extrajeron dos núcleos por cada árbol a la altura del pecho (1.30-1.40 m) y en dirección perpendicular a la pendiente (figura 20A). Una vez extraídos los núcleos se midió la longitud de la albura y el duramen de cada uno (figura 20B). Las muestras se guardaron en popotes, para su conservación y transporte (figura 20A). Finalmente, los orificios de donde se extrajeron las virutas se cubrieron con taquetes de madera del mismo largo y grueso (previamente humedecidos en formol-alcohol), para evitar la entrada de insectos y microorganismos en ellos.



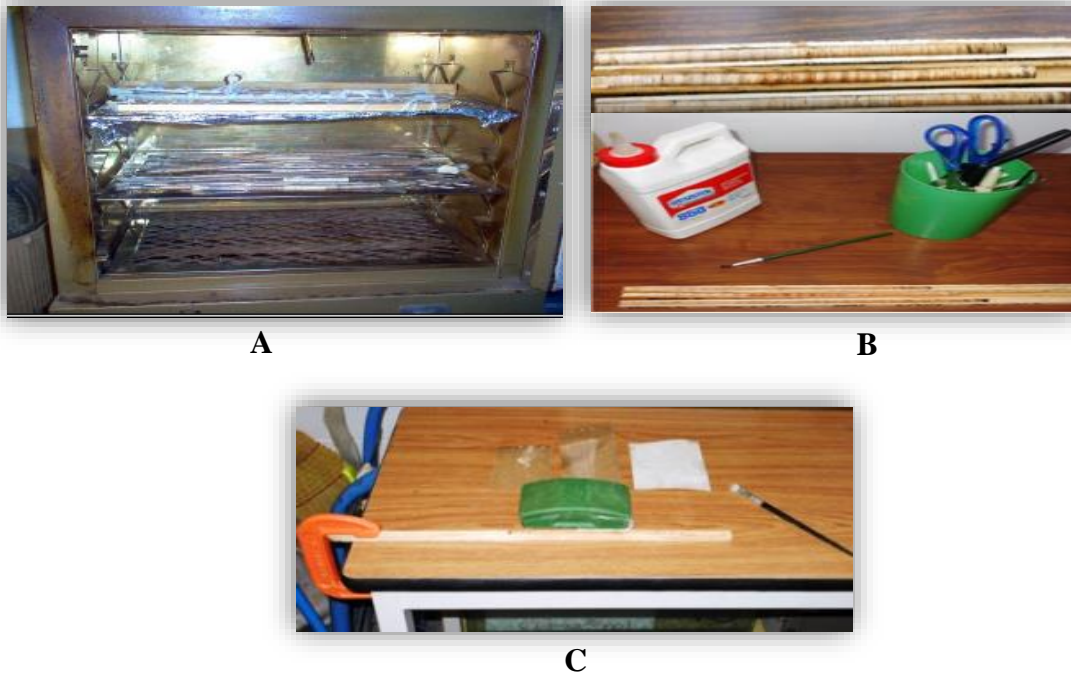
**Figura 20: Extracción de los núcleos con barrena Pressler de 17” y conservación de las muestras en popotes, B) medición de la longitud de la albura y el duramen de los núcleos extraídos**

## **9.2 Trabajo en laboratorio**

### **9.2.1 Tratamiento de las muestras**

Se eliminó la humedad de los núcleos en una estufa de secado a una temperatura de 45°C durante 72 horas (figura 21A). Una vez secas las muestras se orientaron de acuerdo con tres criterios (Stokes & Smiley, 1996): 1) se ubicó en la parte superior elíptica que describe la médula, cuando esta no fue visible, se utilizó el criterio 2) que consistió en que las fibras de las traqueidas quedaran orientadas de manera vertical, y el criterio 3) fue que la posición del núcleo fuera de acuerdo al reflejo de la luz sobre la cara de la viruta (figura 21B).

Ya que estuvieron orientadas las virutas se adhirieron al bastidor con pegamento blanco líquido y se envolvieron firmemente con una cuerda para su secado, durante 24 horas. Una vez secas las muestras, se pulieron (figura 21C) utilizando lijas secuenciales en granos del número 50, 80, 120 y 400 para evidenciar los anillos (Stokes & Smiley, 1996; Villanueva Díaz et al., 2009).



**Figura 21:** Donde A) Secado de las muestras en estufa (tomado de Cruz Muñoz, 2007), B) orientación de las muestras y adhesión a los bastidores, y C) pulido de las muestras

### 9.2.2 Análisis de las muestras y datos estadísticos

Se realizó el prefechado de las muestras (figura 22A), dividiendo los núcleos en décadas con el fin de facilitar el procedimiento y ordenar la cronología (Stokes & Smiley, 1996). Con el programa WinDENDRO (figura 22B y C) se llevó a cabo la medición del crecimiento total de los anillos (figura 23); las muestras se sincronizaron (crossdating) para evitar el riesgo de contar anillos dobles u omitir el conteo de anillos ausentes (Gutiérrez García, 2004).

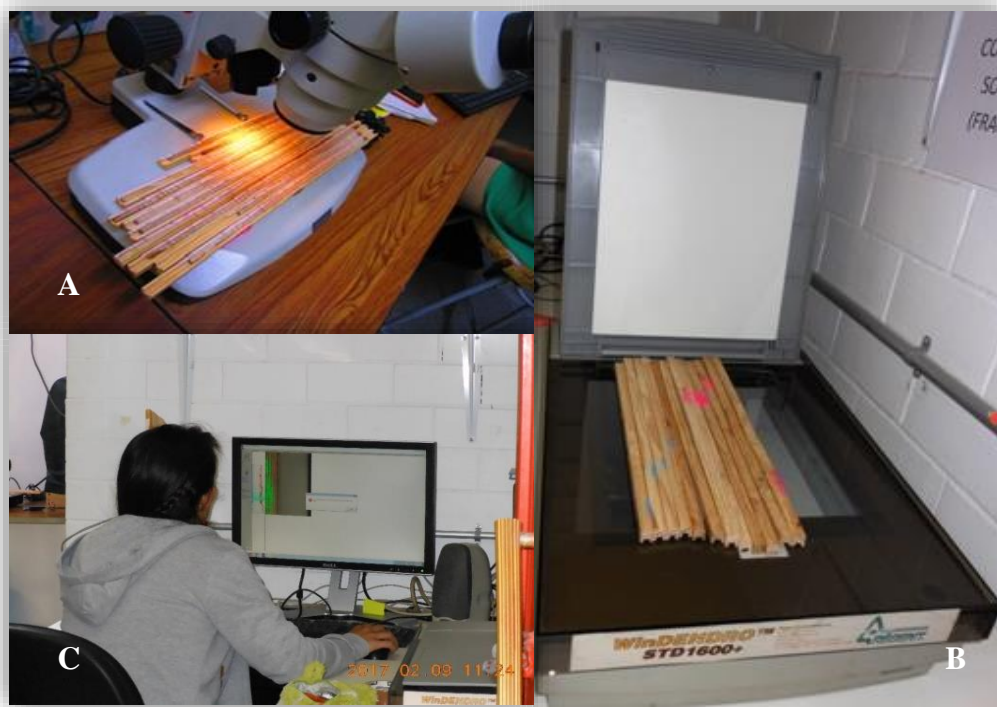
Con base en lo descrito por Larsson (2004), se obtuvieron las ganancias de ancho de anillo (por década) para cada porcentaje de retención de copa. Lo mismo se realizó con el índice de sensibilidad de acuerdo con Vogt et al. (s. f.) para conocer la variabilidad de las muestras.

Para la obtención de los datos estadísticos, se generó una matriz de datos (cuadro 7) la cual se dividió en columnas con los cuatro porcentos de retención de copa, la media de ancho de



anillo, la desviación estándar y la varianza; y en filas con las décadas y el ancho de anillo por década para cada porcentaje de retención de copa.

A partir de la matriz de datos, con los programas Statgraphics Centurion XV.I y OriginPro 8, se generó: una cronología maestra a la cual se aplicó un polinomio de segundo grado de acuerdo a lo descrito por Cook et al. (1992); una cronología con todos los porcentajes de retención de copa por década, para observar la oscilación del crecimiento de sus anillos en determinados períodos; un análisis de conglomerados de los anchos de los anillos entre los %RC; un análisis de conglomerados entre las ganancias de cada porcentaje de retención de copa; una gráfica con el índice de sensibilidad y la ganancia para cada %RC; una gráfica de medias (décadas vs. categorías de porcentaje de retención de copa) y, un análisis de varianza para la ganancia, el índice de sensibilidad y el crecimiento de los anillos en cada porcentaje de retención de copa.



**Figura 22: A) Prefechado de las muestras, B) colocación de las muestras en el scanner y C) lectura de los anchos de anillo en el programa WinDENDRO**

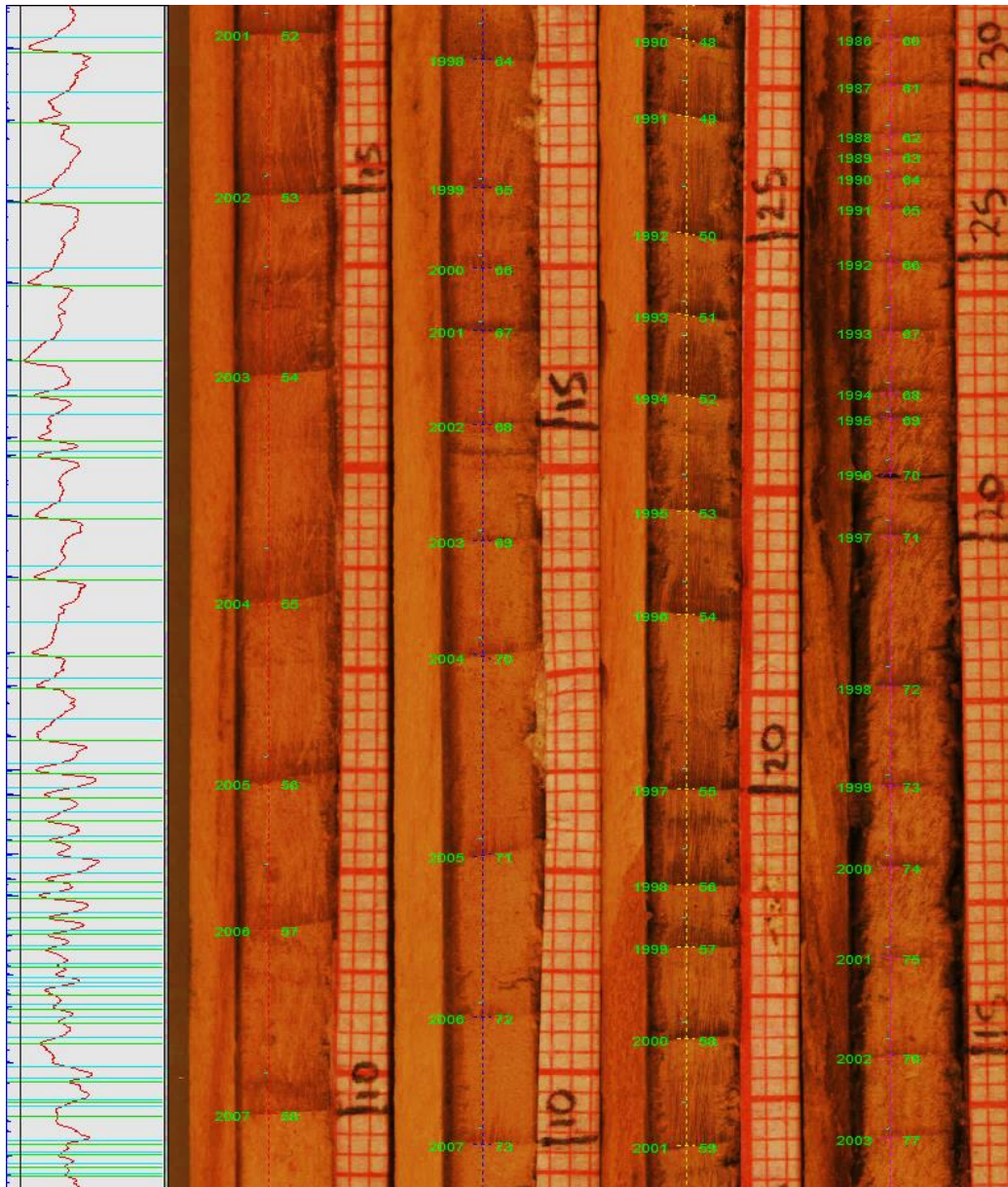


Figura 23: Ancho de anillos de las muestras en el programa WinDENDRO

Cuadro 7: Matriz de datos utilizada para la generación de pruebas estadísticas

<i>Década (anchos anillos)</i>	<i>VITALIDAD 100</i>	<i>VITALIDAD 75</i>	<i>VITALIDAD 50</i>	<i>VITALIDAD 25</i>	<i>X, v, sd</i>
<i>1987-1996</i>	<i>Ancho <math>\bar{x}</math></i>				
<i>1997-2006</i>					
<i>2007-2016</i>					

## 10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron las cronologías de los 48 núcleos de oyamel, construyendo una total (figura 24) a fin de revelar algún factor exógeno que las influyera sobre los anchos de los anillos. Se agruparon doce cronologías (RODAL) correspondientes a cada porcentaje de retención de copa y poder así, determinar su posible asociación con las ganancias en crecimiento, la tesis a probar fue a mayor retención de copa mayor crecimiento anillar y por ende ganancia. Se fechó en las cronologías primarias el período de años 1866—2016. Los rodales observaron periodos similares, habiendo una diferencia mínima entre ellos de 3 años; así el de 25% de retención de copa (RC) el árbol más longevo fue de 1866—2016, le siguió los rodales de 75 y 100% de RC con un intervalo de 1867—2016, y el rodal del 50% de RC fue de 1869—2016.

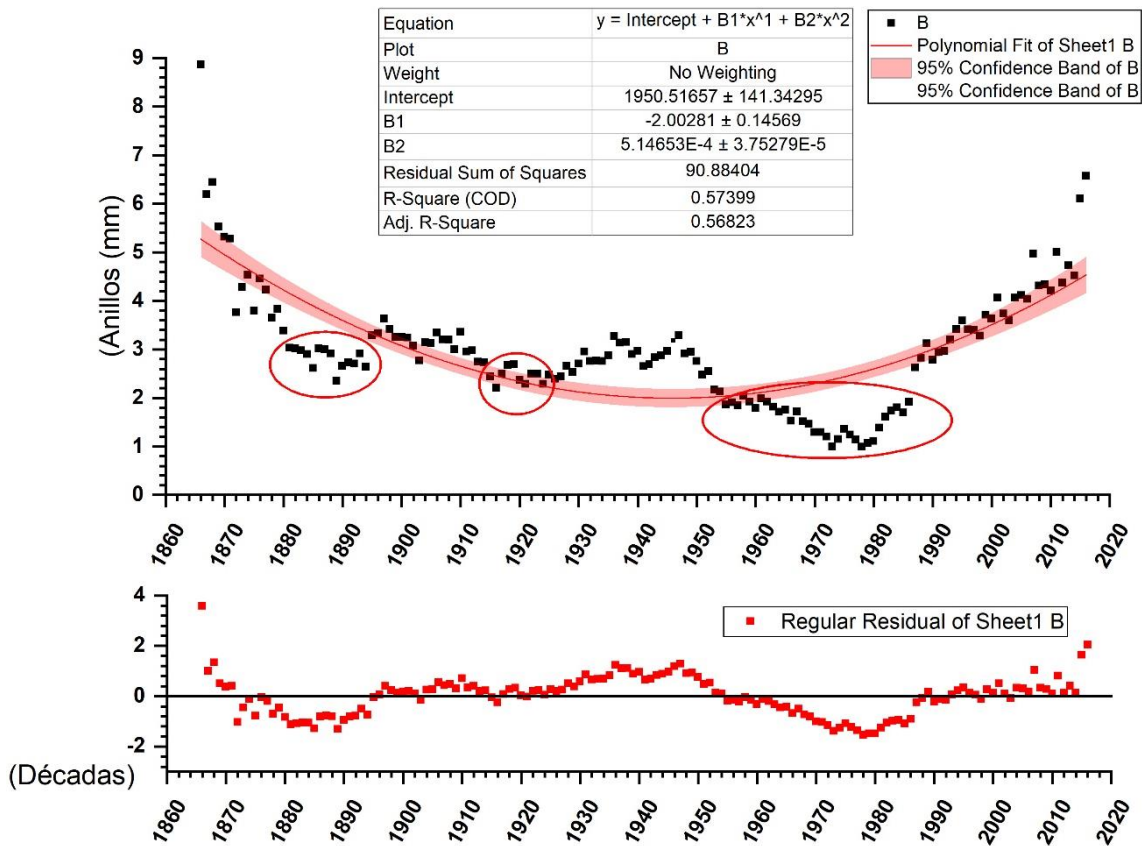
### 10.1 Tendencia del crecimiento de los anillos

La cronología general dató de **1866 a 2016** (150 años), describiendo **tres valles** (círculo rojo) y **una cresta**, para fines de interpretación no se consideraron los primeros 14 años de fluctuación de crecimiento. El primer valle correspondió al período preindustrial (**1881—1894**) de la Zona Metropolitana de la Cuenca del Valle de México (ZMCVM), cuyo ancho de anillo osciló entre **2.344 y 3.028 mm**, y el segundo, de **1915—1924** donde el ancho osciló entre **2.206 y 2.690 mm**, con muy poca variación en el ancho y ambos periodos en un lapso de 9 años. El tercer valle, el más industrializado, concernió a los años **1953—1986** cuyo ancho de anillo osciló entre **0.990 y 2.162 mm**, en un lapso de 32 años. Es el período que pertenece a la etapa de crecimiento exponencial en la actividad industrial, demográfica y vehicular, con el consecuente incremento en el consumo de gasolina con un alto contenido de azufre en la ZMCVM y donde se registrara mayor contaminación del aire en la Ciudad (70s y 90s).



La cresta concierne al periodo **1987—2016**, donde los anillos registraron un crecimiento que **osciló de 2.624 a 6.569 mm**, durante 29 años; cabe destacar que durante esos años se disminuyó la concentración de contaminantes en la CDMX.

La cronología **GENERAL** (figura 24) permitió determinar que el efecto exógeno sobre el oyamel comparando la concavidad de la curva polinomial que arrojó, es similar a la descrita por Cook (1990) para el abeto rojo en donde se demostró el efecto de la precipitación (sequía) y la temperatura sobre el crecimiento.



**Figura 24: Cronología general con las oscilaciones en crecimiento de los cuatro %RC**

Con la cronología general se descartó el efecto de competencia intraespecífica con otras poblaciones de árboles (*Pinus* spp) de acuerdo con Cook et al. (1992) y los registros de los anillos ( $\pm 4$  mm) coinciden con los publicados por Watmough & Hutchinson (1999) para décadas

posteriores a 1900. Análogo Calva (2012) determinó en un rodal de oyamel (68 núcleos) de cuatro Áreas Naturales de la Cuenca del Valle, cuya altura del árbol osciló de entre 18 a 40 m por conteo de anillos, una edad de 58 a 162 años, de 1930 hasta 1980 el promedio de década osciló de 2 a 2.4 mm, con un incremento notable para las décadas comprendidas de 1980 a 2010, con 2.7 a 3.7 mm promedio.

Las temperaturas registradas para el año 1960 a 1974 oscilaron entre 13.2 y 14.8 °C; y de 1975 a 1994 (15.4 a 16.4 °C); durante la sequía del periodo 1988 a 1993, **el promedio de anillos osciló entre 2.787 a 3.206 mm**. Cook et al. (1992) reportó que metodológicamente se expresa la **señal** y el **ruido** en la datación de los anillos de árbol, el ruido se representa por el crecimiento radial (aumento en diámetro del tronco) que es efecto de la condición de copa del árbol.

La figura 24 se contrasta con las obtenidas por Cook et al. (1992) se infiere competencia entre las poblaciones y que los periodos de generaciones que podrían deberse a disturbios que repercuten en el rodal, eliminan la competencia intraespecífica. La cronología es parecida a la presentada por Cook et al. (1992, p. 99), que representa el crecimiento de un bosque de *Picea Rubens* con copa cerrada, la cual se contrasta entre el año 1864 (inicio de la cronología del presente trabajo) y 1977 (fin de la cronología de los autores citados anteriormente); existiendo una analogía en ambos estudios.

*Las respuestas de los árboles a los disturbios endógenos y exógenos se consideran como señal que se va registrando en los anillos de crecimiento. La perturbación endógena es la respuesta de un árbol ante un disturbio local, proceso que afecta al árbol; por otro lado, las exógenas provienen del exterior afectando al rodal en su conjunto (Cook et al., 1992); efecto de borde, contaminación del aire, depósito atmosférico, y ozono entre otros no menos importantes.*

Con las varianzas de los anchos de los anillos (cuadro 8) se determinó la posible influencia del régimen climático con respecto al período de años de la cronología (crestas y valles), su efecto en los rodales es homogéneo, pero no, con la retención de copa. La mayor variación del crecimiento natural se registró de **1866 a 1914**; el desarrollo de los anillos fue normal, como se determina en investigaciones de Europa (Keller, 1983) pese a que en 1875 a 1908 según lo reportó Hernández Cerda et al. (2007), se agudizó con la desecación de los lagos.

**Cuadro 8: Varianzas del ancho de anillo de los 3 ciclos**

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
<b>1866—1914</b>	48	176.024	3.592	1.403
<b>1915—1952</b>	37	103.331	2.719	0.077
<b>1953—2016</b>	63	171.717	2.683	1.797

El período **1915 a 1952** la variación en el ancho de los anillos fue la menor con respecto al promedio, lo que infiere que los factores exógenos (régimen del clima) fueron regulados por los rodales, ya que en este período se registraron sequías (1925—1951). De acuerdo con Gómez Díaz et al. (2011) dividen los requerimientos ambientales del bosque de *A. religiosa* en cuatro categorías de acuerdo con el tipo de condición (cuadro 9), desde no adecuada hasta adecuada, en el que se observa que el oyamel es sensible a temperaturas por arriba de los 16° C y a precipitaciones por debajo de los 800 mm al año.

**Cuadro 9: Requerimientos ambientales de *A. religiosa***

Variable	Categoría			
	Adecuada	Moderadamente adecuada	Poco adecuada	No adecuada
<b>Precipitación anual (mm)</b>	1000-1800	800-1000 >1800	700-800	<700
<b>Temperatura media anual (°C)</b>	8-14	7-8 14-16	6-7 16-20	<6 >20
<b>Período de sequía (meses)</b>	0-3	4	5-6	>7

El período de **1953—2016** mostró la mayor variabilidad en el crecimiento, durante este periodo la sequía y la ola de calor se presentaron de manera aguda en 1998, y en la cumbre “Mexico’s Third National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change (2005)” se expuso que la precipitación disminuyó (1951—2010) en la ZMCVM de  $-2.5$  a  $-10$  (mm/año por decenio), con respecto al promedio de inicio de siglo.

Un aspecto que se suma al climático ya descrito, es la contaminación del aire registrado a partir de 1970 y hasta el año 2000. Es factor exógeno (antropocenos) que se relaciona con mucha profundidad con la fotosíntesis y la respiración en cada árbol y a escala poblacional.

En el cuadro 10 se concentran los registros de los anchos por década y para cada rodal o **porcentaje de retención de copa**, se demostró que los árboles con copa de **25 y 50%** de retención, tuvieron un promedio del ancho de anillos (**2.341 y 2.566 mm**) por debajo del global (**2.630 mm**); en contraste con los porcentajes de **75% y 100%** (**2.757 y 2.856 mm**).

**Cuadro 10: Ancho promedio de anillos de crecimiento en cada década, por porcentaje de retención de copa**

Década	Ancho promedio de anillos (mm) 25% RC	Ancho promedio de anillos (mm) 50% RC	Ancho promedio de anillos (mm) 75% RC	Ancho promedio de anillos (mm) 100% RC
1867-1876	4.637		3.730	5.284
1877-1886	3.419	2.901	3.234	3.505
1887-1896	3.623	1.834	4.308	2.023
1897-1906	2.798	4.299	3.044	2.757
1907-1916	2.609	3.511	2.404	3.017
1917-1926	2.461	2.382	2.362	2.669
1927-1936	2.835	3.190	2.846	2.205
1937-1946	2.344	3.165	3.488	2.756
1947-1956	2.098	2.369	2.800	2.762
1957-1966	1.225	1.995	1.854	2.260
1967-1976	1.007	1.388	1.522	1.379
1977-1986	1.233	1.153	1.942	1.421
1987-1996	2.309	2.931	3.006	4.085
1997-2006	3.039	3.194	3.589	5.143
2007-2016	4.129	3.093	6.285	5.240
<b>Promedio</b>	<b>2.341</b>	<b>2.566</b>	<b>2.757</b>	<b>2.856</b>

La tesis de la reducción del anillo por efecto de daño en copa producido por la contaminación se sostiene debido a que el sistema fotosintético baja su intensidad por la destrucción de los pigmentos clorofílicos y por ende la producción de azúcares disminuye, aumenta la respiración.

Watmough & Hutchinson (1999) reportaron una cronología del oyamel del PNDL, cuyos anchos de anillo (**máximo 3.7 mm y mínimo 0.5 mm**) fueron similares a los publicados en el estudio, los investigadores asociaron aumento en la concentración de metales pesados y disminución del anillo. Salas & Sánchez (2016) reportaron para el **paraje “Pantano”** un **ancho promedio en anillos de *A. religiosa* de 1.30 mm**, el ancho promedio de anillos de todos los porcentajes de retención de copa supero este valor, contrario a lo reportado por Jiménez López (2019) quien determinó un **crecimiento promedio total de 2.36 mm** para los núcleos de oyamel del PNDL, valor que supero el promedio de ancho de anillos del 25% RC. Sin embargo, la media de crecimiento de todos los porcentajes de retención de copa, estuvo por debajo de las medidas reportadas para oyamel por Flamand & Huerta (1964) de 5 mm y Huerta Crespo (1978) con una **estimación aproximada de entre 3.71 y 8.10 mm**.

En las figuras 25 y 26 se representan las cronologías de 1866 a 2016, y para cada retención de copa, el **rodal con 25% RC** (figura 25A) registro un promedio en ancho de anillo de **2.341 mm**; el **rodal con 50% RC** (figura 25B) fue de **2.566 mm**. Asimismo, el **rodal con 75% RC** (figura 26 A) arrojó promedio de **2.757 mm** y el **rodal de 100% RC** (figura 26 B) fue de **2.856 mm**, en los promedios indirectamente se podría registrar el daño causado por los contaminantes atmosféricos durante el período de 1957—1986, siendo los más afectados, los rodales de 25 y 50% RC (1.225, 1.007 y 1.233 mm para 25%; 1.995, 1.388 y 1.153 mm para 50%).

De acuerdo con Cook et al. (1992) una propiedad importante de los árboles que se ven influenciados en su crecimiento por factores endógenos del rodal es la probabilidad de que sean eventos aleatorios tanto en el espacio como en el tiempo, lo que significa que las fluctuaciones en los anchos de anillo de cada árbol serán divergentes, a pesar de que se desarrollen en el mismo lugar, esto concuerda con las cronologías individuales para cada por ciento de retención de copa donde se pudo observar la diferencia entre las fluctuaciones de cada cronología, las diferencias en crecimiento también fueron encontradas por los investigadores en cuatro abetos rojos del mismo rodal en EE. UU. (ID core 078111, 078031, 078021 y 078011).

Así mismo, se puede observar que la tendencia en crecimiento de todos los rodales concuerda de 1950 a 1980, lo que indica de acuerdo con Cook et al. (1992) que existen factores exógenos (contaminación atmosférica) que ejercen presión en todos los porcentos de retención de copa.

El comportamiento de las cronologías por década en las figuras 25 y 26 es parecido al que muestran los autores como ejemplo de tres árboles *Tsuga canadensis* influenciados por la actividad de tala a principios del siglo XX (ID core 048232, 048132 y 048121, p. 103).

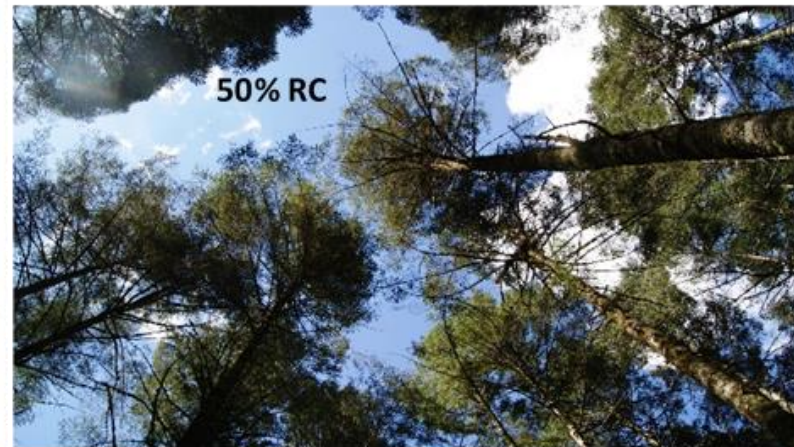
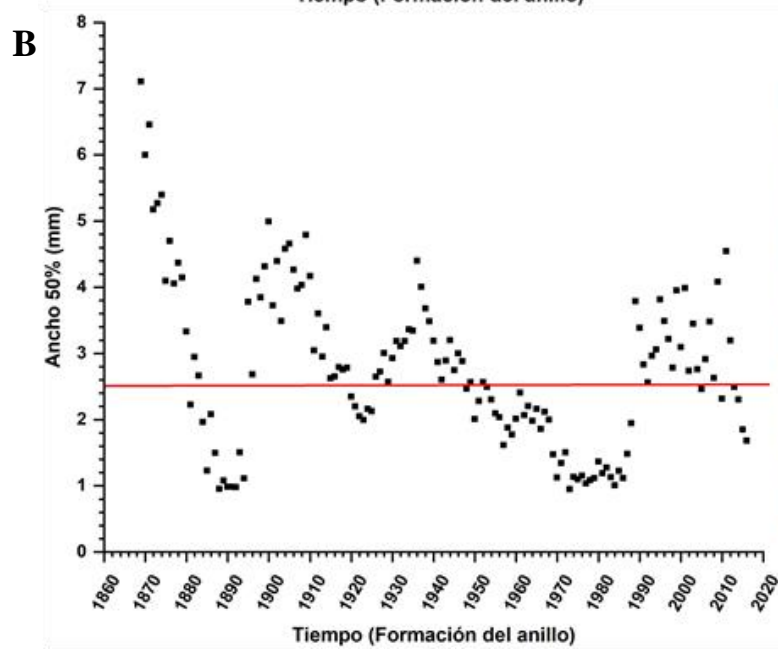
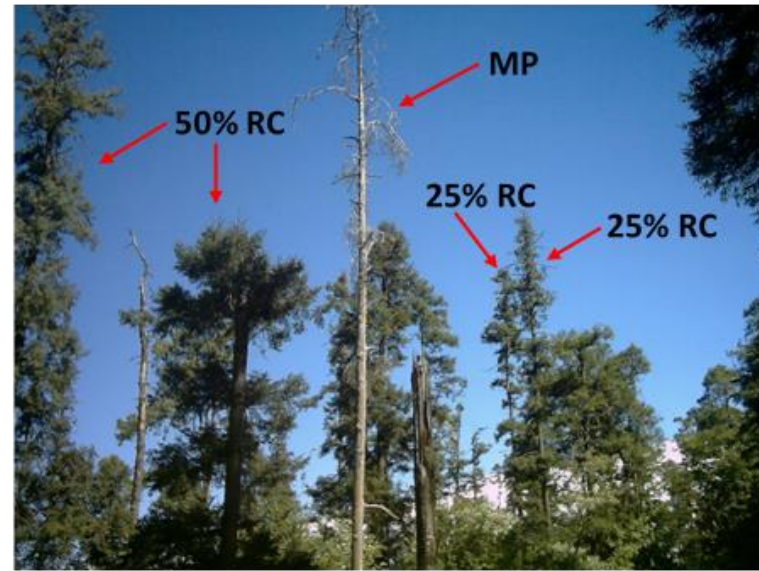
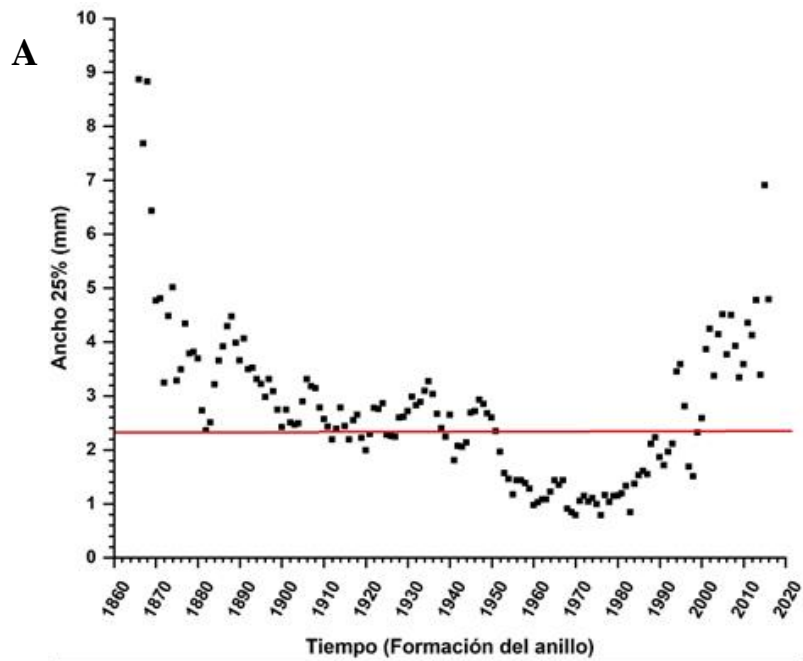


Figura 25: Cronologías individuales de árboles con 25 y 50% retención de copa



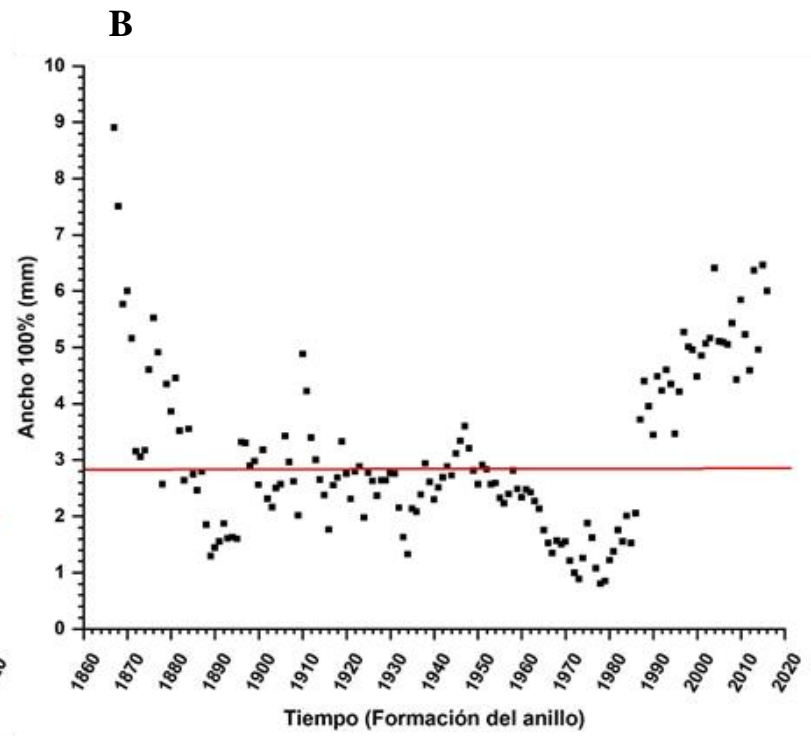
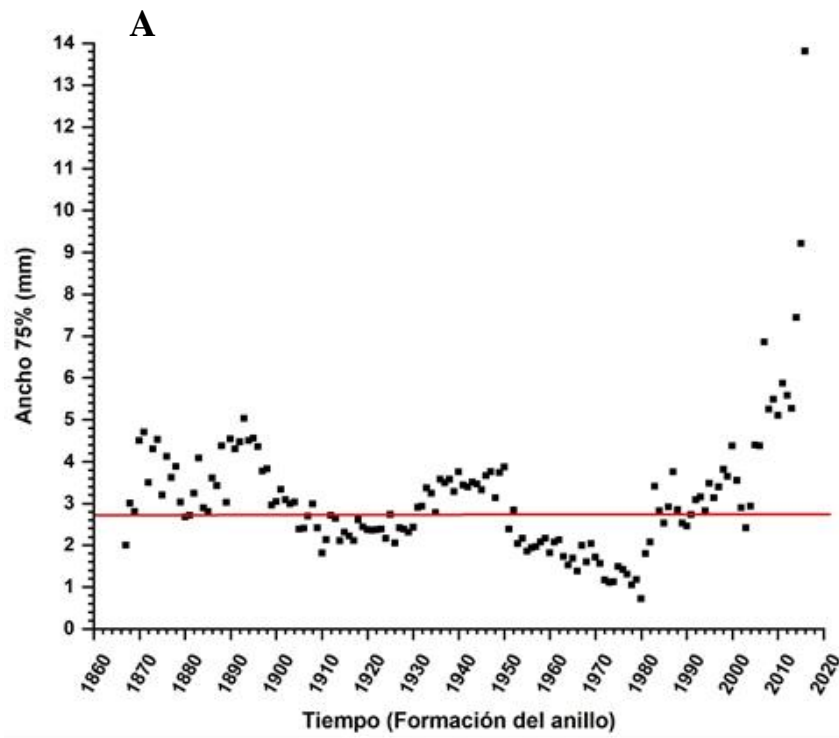


Figura 26: Cronologías individuales de árboles con 75 y 100% retención de copa



## **10.2 Ciclicidad de las cronologías y su relación con los factores exógenos**

La variabilidad del crecimiento por década en las cronologías está representada en la figura 27, se muestran los cuatro períodos (líneas) que indican un cambio en el ancho de los anillos de crecimiento, comparando su comportamiento entre los cuatro porcentajes de retención de copa. Así, considerando que las décadas 1866—1950 es el crecimiento del bosque (etapa brinzal) y que la de 1957—1966 corresponde a la juvenil cuando el bosque comenzó a ser perturbado por contaminación atmosférica, lo cual se reflejó en la disminución del crecimiento, entrando a la etapa adulta dañado y que se reflejara en la retención de copa.

Los cuatro períodos indicarían perturbaciones (Cook et al. 1992) por efecto de la antropocenos, ya que presentan sincronía en el tiempo con eventos atmosféricos de disturbio fuera del rodal. En combinación con los cambios en el patrón del clima se observa en el decline forestal.

A pesar de que la tendencia en crecimiento para todos los porcentajes de retención de copa parece tener un comportamiento similar, los anchos de anillos divergen, siendo menores para 25 y 50% RC, y mayores para 75 y 100% RC, lo que podría indicar una respuesta de perturbación endógena de acuerdo a lo descrito por Cook et al. (1992), debida a la relación entre la densidad de la copa y el crecimiento.

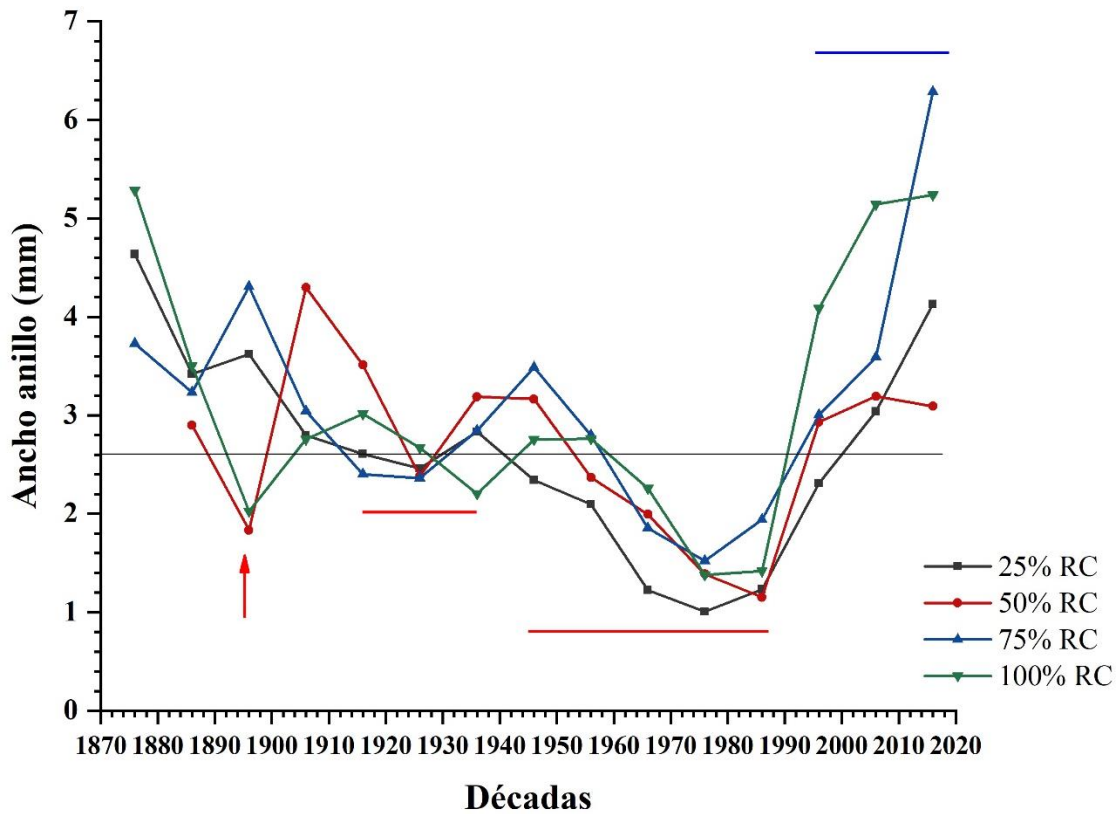


Figura 27: Cronologías de los porcentajes de retención de copa (%RC) por década

### 10.2.1 Primer valle de crecimiento (1887—1896)

La disminución en este período de tiempo se puede atribuir a eventos de sequías registradas antes y durante los años que abarcó (figura 28), en este período (flecha roja de la figura 27) los anillos de crecimiento oscilaron entre los **1.834 y 2.023 mm** para **50 y 100% RC**, respectivamente, lo que indicó una disminución en el crecimiento, ya que los anchos se encontraron por debajo de la **media** para todos los porcentajes de retención de copa, que fue de **2.630 mm**; de acuerdo con Contreras Servín (2005), Domínguez (2016), Florescano (1980), Florescano Mayet et al. (1980), García Acosta (1997) y Hernández Cerda et al. (2007), durante el período de 1821-1900 el centro del país registró 27% de las sequías totales nacionales, dentro de las sequías regionales que afectaron a la Ciudad de México se encuentra la de 1880, 1885 y 1893.

Así mismo, Contreras Servín (2005) menciona que en el período de tiempo que va del año 1877 al año 1901, se aprecia en diversos observatorios, entre ellos el de la Ciudad de México, que se presentaron lluvias por debajo del promedio anual.

### **10.2.2 Segundo valle de crecimiento (1917—1926)**

En este período, **tres de los porcentos de retención de copa** tuvieron un ancho promedio por debajo de la **media (2.630 mm)**, para **50% RC** fue de **2.382 mm**, en el caso de **25 y 75% RC** comenzaron a disminuir su crecimiento una década anterior (1907—1916), con anchos promedio de **2.609 y 2.461 mm** para **25% RC**, y **2.404 y 2.362 mm** para **75% RC**; la disminución en crecimiento del oyamel para el PNDL en esta década se puede observar también en la cronología de Watmough & Hutchinson (1999), donde los valores oscilaron entre **1.3 y 1.8 mm** en el ancho de los anillos.

Contreras Servín (2005), Florescano Mayet et al. (1980) y Hernández Cerda et al. (2007) señalan que una de las sequías más severas del periodo del Porfiriato fue la de 1917 que cubrió casi todo el país. Las sequías en el México posrevolucionario se dividen en dos períodos de acuerdo con Florescano (1980); el primer período abarca los años 1910-1930, aquí, las sequías fueron frecuentes, pero solo la ocurrida en 1925 la reporta como extremadamente severa, afectando entre otros estados a la Ciudad de México, por otro lado Hernández Cerda et al. (2007), reportan para el período de 1910-1930 sequías frecuentes, pero moderadas (figura 28); dichos eventos explican la disminución de los anillos de crecimiento durante este período de tiempo.

# Línea del tiempo de acontecimientos meteorológicos de la Ciudad de México

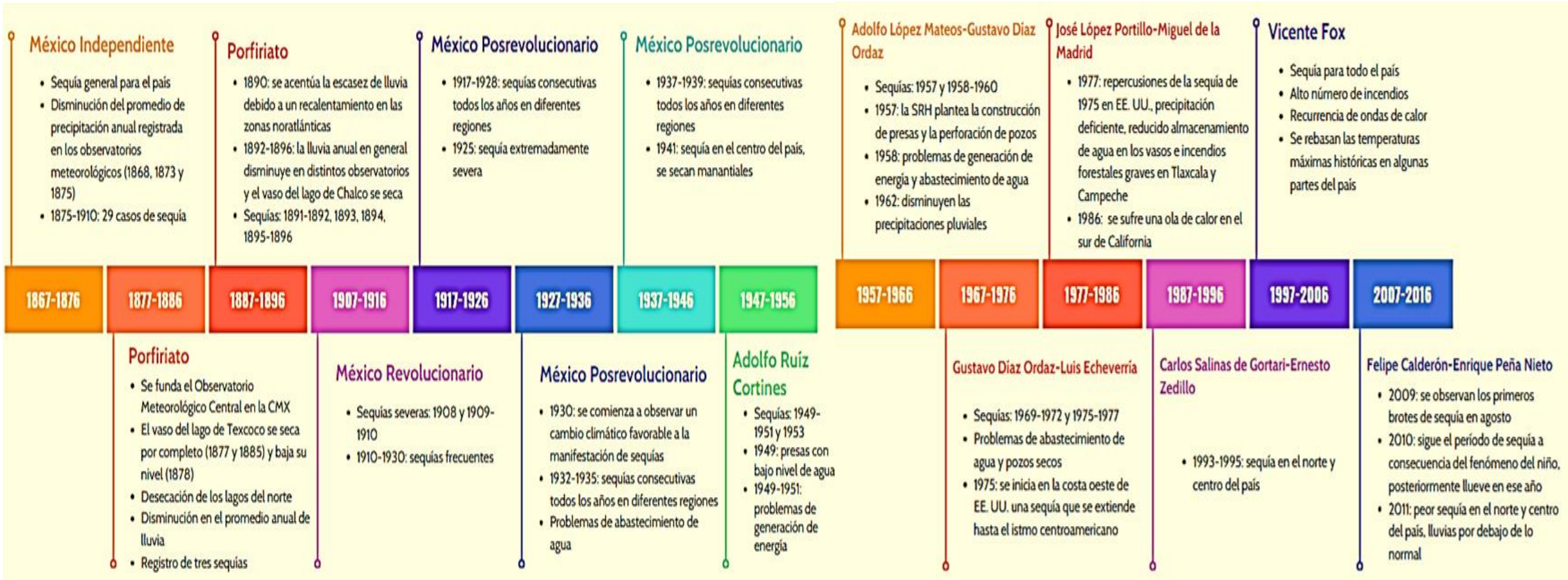


Figura 28: Línea del tiempo de eventos meteorológicos en México

### 10.2.3 Tercer valle de crecimiento (1947—1986) y cresta de crecimiento (1987—2016)

El **tercer período** comprende **cuatro décadas de disminución de crecimiento (1947—1986)**, los cambios de crecimiento en cada década sucedieron de la siguiente forma:

- En la **RC del 25%** la disminución del anillo (**2.343 mm**) comenzó en **1937—1946**, pudiéndose atribuirle periodos de sequía ocurridos durante 10 años (figura 28), con la predisposición de los árboles a la contaminación, continuó disminuyendo el crecimiento anillar (**2.098 mm**) en **1947—1956**, extendiéndose cuatro décadas más (**1957—1966**, **1967—1976**, **1977—1986** y **1987—1996**) con anchos de anillo de **1.224**, **1.006**, **1.233** y **2.308 mm**, respectivamente.
- En la **RC del 50%** se marca una disminución considerable en el crecimiento de los árboles durante cuatro décadas (**1947—1956**, **1957—1966**, **1967—1976** y **1977—1986**) con anchos de anillo de **2.638**, **1.994**, **1.388** y **1.153 mm**, respectivamente.
- En las **RC de 75 y 100%**, la disminución del crecimiento se extendió tres décadas, comenzando en **1957—1966** donde el crecimiento fue de **1.853** y **2.259 mm**, respectivamente, le siguió la década de **1967—1976** (**1.521 mm** y **1.379 mm**, respectivamente) y en **1977—1986** el crecimiento anillar fue de **1.941** y **1.420 mm**, para **75 y 100% RC**, respectivamente.

Estos datos concuerdan con los reportados por distintos investigadores para los anillos de crecimiento de *A. religiosa* del PNDL, Alvarado R. et al. (1993) reportaron una **oscilación entre 0.66 y 1.70 mm** para un **período de tiempo entre 1958 y 1988**; Watmough & Hutchinson (1999) representan en su cronología una disminución de crecimiento de los anillos a partir de **1960** con un ancho de **1.4 mm** y que se extendió hasta el final de la cronología (**1996**) con un ancho de

anillo de **0.5 mm**; y Bernal-Salazar et al. (2002) observaron un descenso en el ancho de anillos a partir de **1970 (<1 mm)** que se extendió hasta el año **2000**.

Así mismo Razo Ángel (2005) señala que el **anillo más delgado** correspondió al año **1972** y fue de **1.5 mm**, en el período de tiempo de **1970—1977** se observó un ancho de anillos (**<2 mm**), en los siguientes años hubo una recuperación en el crecimiento; Salas & Sánchez (2016) reportaron en distintos parajes del parque, **anchos de anillos (<3 mm y 4 mm), de 1962 a 1976 y de 1976 a 1994, respectivamente**; por otro lado Jiménez López (2019) reporta los **anillos más anchos (>3 mm)** para los años **1960—1975** con un **promedio de 3.43 mm**, sin embargo, de **1976—1983** el **crecimiento disminuyó**, con un **ancho promedio de 2.92 mm**, que se **redujo** más para los años **1984—2003** con un **crecimiento medio de 1.38 mm**.

El **cuarto período** de tiempo marcado en la figura 27, comenzó en la década de **1987—1996** donde el **crecimiento de todos los árboles aumentó**, siendo el de **25% RC** el único que se mantuvo **por debajo de la media (2.603 mm)** con **2.309 mm**, para **50% RC** fue de **2.931 mm**, para **75% RC** fue de **3.006 mm** y para **100% RC** fue de **4.085 mm**.

En las últimas dos décadas (**1997—2006 y 2007—2016**) los **anillos de crecimiento de todos los porcentajes** de retención de copa **superaron** la **media** de crecimiento, siendo de **3.039 y 4.129 mm** para **25% RC**, **3.194 y 3.093 mm** para **50% RC**, **3.589 y 6.285 mm** para **75% RC**, y, **5.143 y 5.240 mm** para **100% RC**. Por esta razón, se considera a la media del ancho de los anillos como un parámetro confiable para hacer inferencias por cada stand representado por la retención de copa.

Manzanilla (1974) menciona que el bosque de oyamel tiene la particularidad de promover un microclima que le favorece, lo que podría explicar la recuperación en crecimiento de oyamel a partir de la década de 1987—1996.

Se infiere que este período de tiempo coincide con la recuperación del crecimiento de los anillos de *A. religiosa*, similar a lo reportado por Razo Ángel (2005) para 1993—2004, con una oscilación de **2.5 a 5.5 mm**, este último ancho es del año **1996**, siendo el **anillo de crecimiento más ancho de toda la cronología**. También hay similitud con lo señalado por Salas & Sánchez (2016), para 1994—2005 con un **incremento (>4 mm)** del paraje Cruz Blanca; y con los años de mayor crecimiento de *A. religiosa* reportados por Jiménez López (2019) que fueron **2003—2006** con **anchos de hasta 3.20 mm** y **2004—2009** con anillos que alcanzaron los **3 mm** de tamaño.

Los anchos de anillo de este período no concordaron con lo reportado por Watmough & Hutchinson (1999) para los años **1987—1997** con los valores más bajos para todas las cronologías que oscilaron entre **0.5 y 0.7 mm**, sin embargo, en el presente estudio, el porcentaje de retención de copa de **25%** se **mantuvo con un crecimiento por debajo de la media**, lo que concuerda con el estudio de dichos autores, pues uno de los **criterios** utilizados en su muestreo fue la **defoliación de árboles** de entre el **20 y 50% de su copa**.

Para ambos períodos de tiempo se realizó un análisis de las fluctuaciones de crecimiento, comparando los eventos meteorológicos (figura 28) y los eventos de contaminación atmosférica (figura 29) con las posibles respuestas fisiológicas de *Abies religiosa* ante estos cambios.

Respecto a los **eventos meteorológicos** que surgieron dentro de los años **1947—1986**, Florescano Mayet et al. (1980) mencionan la **presencia de 38 sequías** en los años comprendidos entre **1910 a 1977**, con seis sequías consecutivas en los años 1949—1951, 1969—1972 y 1975—1977; los años que destacan por las sequías extremadamente graves son 1957, 1960, 1962, 1969 y 1977, estos autores atribuyen dichos eventos a la observación de “un cambio climático favorable a la manifestación de la sequía”.

Para el período de **1987—2016**, García et al. (2002) señalan que en **1993 y 1995** se presentó una **sequía en el norte y centro del país**. Así mismo en **1998 una sequía con efectos en todo el país**, de acuerdo con Hernández Cerda et al. (2007) en **1998** se reportaron **14,000 incendios** que **afectaron 530,000 ha**, **21%** de estas correspondieron a **zonas forestales**. Dichos autores también señalan la **recurrencia de ondas de calor** en este año, lo que provocó que las **temperaturas máximas históricas se rebasaran** en algunos lugares del país, incluida la **Ciudad de México**, García et al. (2002) afirman que a **principios de mayo de 1998** se registró la **temperatura más alta observada** hasta el momento (**34.7°C**), rebasando **1°C** de la máxima histórica. “Aunado a lo anterior, en la **periferia de la Ciudad de México**, se tuvo el **mayor número de incendios forestales**, ocasionando un **valor alto de contaminación**” (*op cit.*).

De **1999—2008** no se tiene conocimiento de un registro de sequías severas en México, de acuerdo con Esparza (2014) en **2009** se suscitó **una sequía** que afectó **todo el país** incluyendo la **Ciudad de México**, así mismo en **2010**, el equipo técnico de CONAGUA señaló que se estaba padeciendo **sequía** debido al **fenómeno del niño** (Domínguez, 2016; Esparza, 2014).

Los mismos investigadores mencionan que para el año **2011** se volvió a presentar un episodio de **sequía y de forma más severa** que para el 2009, Domínguez (2016) señala que el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) dijo que: “las condiciones de sequía se iban a alargar y que por esta razón iba a ser más difícil que con una temporada normal de lluvia se restableciera la humedad necesaria”.

El **cuadro 11** describe la **precipitación media acumulada por cada década** y el crecimiento de los anillos en cada porcentaje de retención de copa, los datos se obtuvieron de los registros (Anexo 4) de las estaciones meteorológicas “La Venta Cuajimalpa” (1949-1960), “Desierto de los Leones” (1961-1987) y “Desviación Alta al Pedregal” (1988-2016), debido al



cierre de las dos primeras estaciones mencionadas, se utilizaron los datos de la tercera estación para los últimos años de crecimiento. Cabe mencionar que no hubo registros para el año 2009, y los de 2011 y 2012 fueron insuficientes, con 7 y 3 meses de registro, respectivamente.

De acuerdo a lo mencionado por Gómez Díaz et al. (2011) una **precipitación media anual menor a 800 mm** crea un **ambiente poco favorable para el desarrollo de *A. religiosa***, de acuerdo a los datos de precipitación media acumulada por década, de **2007-2016** la precipitación estuvo por **debajo** de los **800 mm** y de **1987-1996** fue de solo **878.43 mm**, por lo que dicha variable pudo influir en el crecimiento correspondiente a esos años.

**Cuadro 11: Precipitación (Pp) media acumulada por década vs. Ancho de anillos (AA) por cada %RC**

Década	Pp Media Acumulada (mm)	AA 25% RC	AA 50% RC	AA 75% RC	AA 100% RC
<b>1947-1956</b>	1091.563	2.098	2.369	2.800	2.762
<b>1957-1966</b>	1237.190	1.225	1.995	1.854	2.260
<b>1967-1976</b>	1377.940	1.007	1.388	1.522	1.379
<b>1977-1986</b>	1302.530	1.233	1.153	1.942	1.421
<b>1987-1996</b>	878.430	2.309	2.931	3.006	4.085
<b>1997-2006</b>	1089.720	3.039	3.194	3.589	5.143
<b>2007-2016</b>	634.957	4.129	3.093	6.285	5.240
<b>Promedio</b>	1087.476	2.148	2.303	2.999	3.184

En la **figura 29** se puede observar que la **problemática de contaminación atmosférica** en la **Ciudad de México** comenzó en **1946** que fue el período de **mayor expansión industrial y vehicular**, los eventos de contaminación atmosférica se muestran en dicha figura y abarcan los años **1947—2016**.

# Línea del tiempo de acontecimientos de contaminación atmosférica de la Ciudad de México

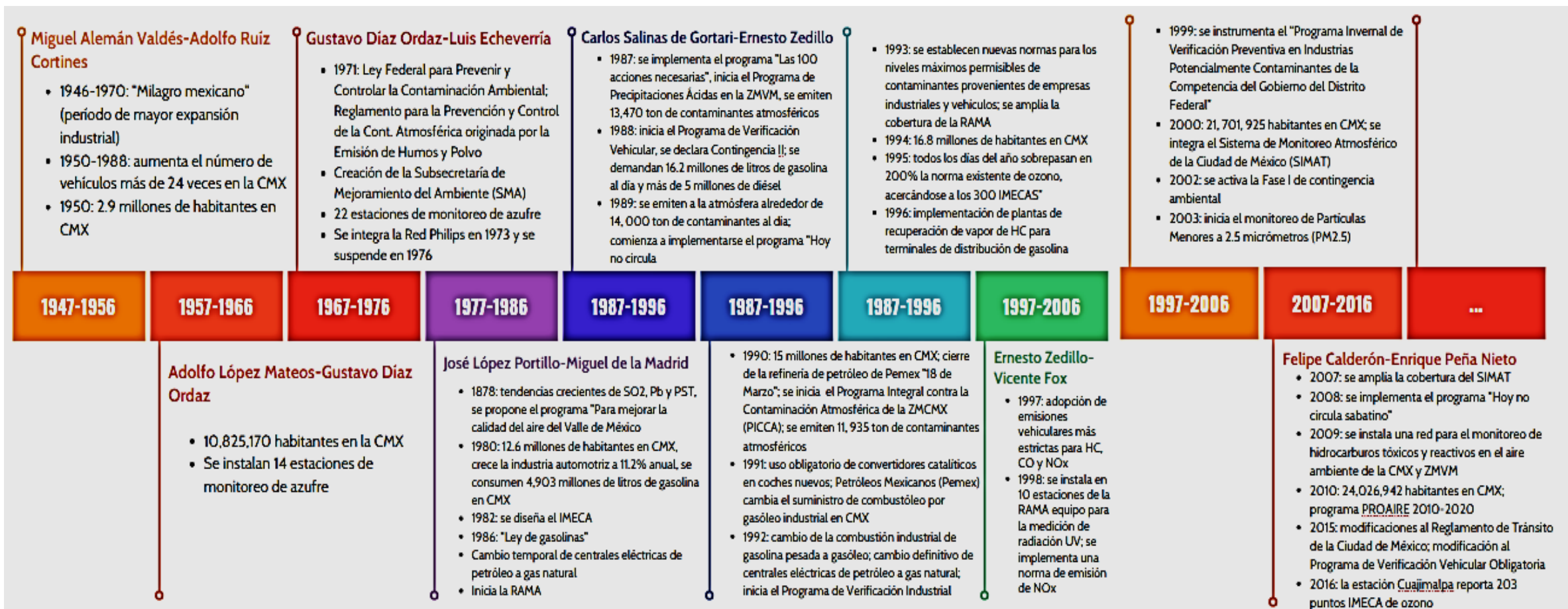


Figura 29: Línea del tiempo de contaminación atmosférica de la Ciudad de México

Soto Coloballes (2017) señala que **a partir de 1946 y hasta 1970**, la **industria** obtuvo grandes apoyos para **fortalecer su crecimiento**, “de acuerdo con el proyecto desarrollista, el **bienestar y el progreso se alcanzarían con la industrialización del país**”, se le denominó a este período “**el milagro mexicano**”, este acontecimiento junto con el **crecimiento poblacional** a partir de los **años 50 (>10 millones de habitantes)** que trajo consigo un **incremento vehicular (>24 veces)**, han sido la **causa de altos niveles de contaminación en CDMX** (Legorreta, 1991).

Para la década de **1967—1976** se **comenzaron a generar leyes para controlar la contaminación atmosférica**, sin embargo, distintos investigadores (Garza & Aragón, 1995; Riveros, 2008; Soto Coloballes, 2017) mencionan que éstas **no fueron suficientes** y en muchos casos **no se cumplieron en su totalidad**, pues a **principios de los años 70** se evidenció la **gravedad de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México**.

Durante la década de **1977—1986** el evento más relevante fue la **crisis económica** de los **años 80** que mencionan Garza & Aragón (1995) la cual **desató diversas problemáticas en la ciudad**, entre ellas el **déficit habitacional** y la **extensión de colonias proletarias hacia la periferia norte y este**, a consecuencia de la **sobrepoblación**, la **contaminación del ecosistema** llegó a **niveles críticos**.

Lo anteriormente descrito concuerda con el tercer período de disminución de crecimiento que inició en la década **1947—1956** y se extendió hasta la década de **1977—1986**, esto se puede observar en la figura 30 (paralelogramo azul).

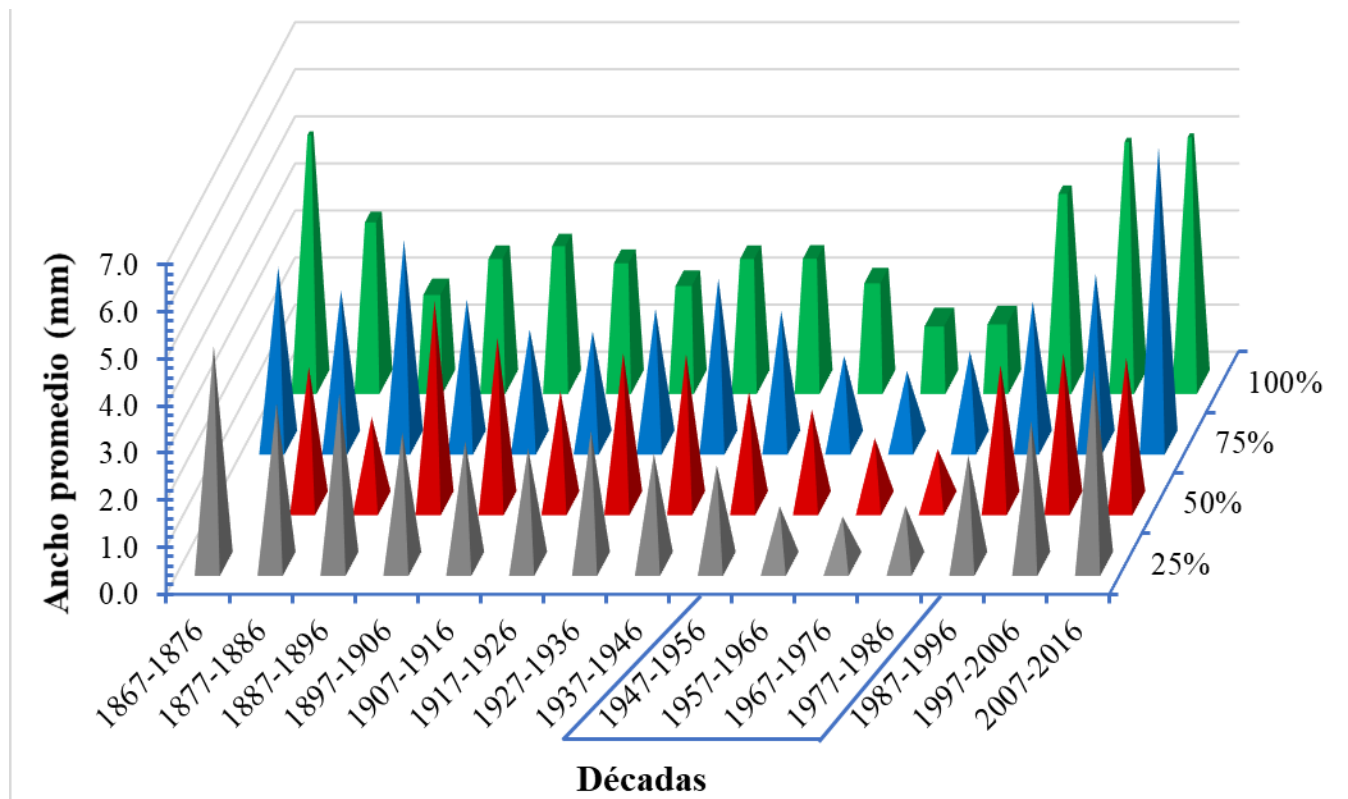


Figura 30: Variación del ancho promedio de anillo de *Abies religiosa* en cada porcentaje de retención de copa

De acuerdo con Garza & Aragón (1995) la medición de contaminantes atmosféricos inicio en los años sesenta con la instalación de las estaciones de monitoreo de azufre y en los años setenta aumentaron dichas estaciones, sin embargo, se utilizaban esporádicamente, por lo que no hay registros de concentración de contaminantes en CDMX durante esos años; en los años 80 se realizó una certificación por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), donde se descalificó el registro de concentración de contaminantes de la Red de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México debido a que no se habían certificado previamente.

A consecuencia de lo anterior, **no existe un registro** en cifras de la **concentración** de **O<sub>3</sub>**, **SO<sub>2</sub>** y **NO<sub>x</sub>** de **1947—1986**, sin embargo, distintos investigadores (Alarcón et al., 1993;

Alvarado R. et al., 1991; Alvarez et al., 1998; Alvarez-Camarena, 1996; Bernal-Salazar & Terrazas, 2002; Ciesla & Macías-Sámamo, 1987; de Bauer et al., 1985; Hernández-Tejeda & de Bauer, 1984; Watmough & Hutchinson, 1999) concuerdan en que el **decline** de *A. religiosa* del **PNDL** en **estos años**, es **consecuencia** de los **contaminantes atmosféricos** presentes en la Ciudad, que llegan a través del **flujo de vientos** al parque.

Todos concuerdan en que un patrón de **moteado clorótico** en las hojas es un síntoma visible asociado con las **altas concentraciones** de **ozono**, empezando como un punteado blanquecino el cual posteriormente cambia a color rojizo—café, finalizando en una decoloración en la parte superior de la superficie de la hoja o en la **necrosis prematura** de las hojas; así mismo la **reducción drástica** en el **ancho de anillos** de crecimiento del oyamel que **comenzó** a principios de los **70's** y **se extendió** por un período de **30 años**, atribuyendo este comportamiento a las **concentraciones** de **ozono, óxidos de nitrógeno** y **azufre**.

Watmough & Hutchinson (1999) atribuyeron el **descenso** en el **crecimiento** de los anillos de *Abies religiosa* a la **cercanía** que tiene el parque a **zonas industriales**, la **deposición ácida** que recibe el bosque y la **exposición** a **altas concentraciones** de **ozono**. Dentro del mismo estudio, reportan para **1960** un **incremento** de **plomo** en los **anillos de árbol** el cual pudo deberse al mayor uso de gasolina (con alto contenido de plomo y azufre) en esos años, así como, a procesos industriales que contribuían con las altas concentraciones de dicho contaminante.

De acuerdo con Reich (1987) y Smith (1981), ciertos contaminantes atmosféricos como el **O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>** y los **NO<sub>x</sub>** ejercen un **impacto** importante sobre la **fotosíntesis**, los cuales **entran** en las **hojas** a través de **aberturas** en los **estomas** o por la **absorción** en la **superficie** de la **hoja**, al generar **alteraciones** en la **tasa fotosintética**, a su vez, **alteran** su mecanismo para la **asignación** de **carbohidratos**, asignando **más recursos** a **mantenimiento** y **reparación**, y **menos recursos** a **crecimiento** (Pallardy & Kozlowski, 2008; Smith, 1981).

Lo anterior se vio reflejado en las tasas de crecimiento de cada porcentaje de retención de copa, de tal modo que para **50 y 25% RC** los **efectos** de la **contaminación atmosférica** se vieron reflejados **una y dos décadas antes**, así mismo tuvieron los **crecimientos más pequeños** de **toda la cronología**, diferente a **75 y 100% RC** que, a pesar de haber sido susceptibles a los contaminantes atmosféricos, tuvieron una **tasa de crecimiento mayor**, la cual se mantuvo **constante**, esto indica que lograron un **equilibrio** en la **asignación** de **carbohidratos**, a pesar de los factores exógenos que ejercían presión.

Para la década de **1987—1996** los árboles de todos los porcentajes de retención de copa comenzaron a aumentar su crecimiento, condición que continuó hasta la década de **2007—2016**, este período de tiempo coincide con el incremento de programas implementados para disminuir las emisiones de contaminantes atmosféricos en la CDMX y las leyes emitidas para el mismo fin (figura 29). Un ejemplo de esto es lo que concluyeron Watmough & Hutchinson (1999) que el **descenso** en los **niveles de plomo** de *A. religiosa* del **PNDL** de **1992—1996**, pudo deberse a la **ley de gasolin**as implementada en **1986**, con la cual se eliminó el plomo de las gasolin

En **1982** “la **Secretaría de Salubridad y Asistencia** estableció los **criterios de calidad** del **aire** para los **principales contaminantes atmosféricos** con base en las **normas** sugeridas por la **Organización Mundial de la Salud**” y hasta **1986** comenzó el **monitoreo continuo** de la **calidad del aire** (Garza & Aragón, 1995), los **registros** de **concentración** de **O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>** se tienen **a partir** de este año (figuras 15, 16 y 17).

En el **cuadro 12** se observa que durante 6 años las concentraciones de **SO<sub>2</sub>** **superaron** la **NOM (0.025 ppm)**, en el caso de los **NO<sub>x</sub>** no se rebaso (**NOM: 0.210 ppm**) y para el **O<sub>3</sub>** solo en **1991** se superó (**>NOM 0.070**). Sin embargo, algunos estudios realizados en plántulas de árboles forestales (cuadro 4) arrojaron que concentraciones (**> 0.015 ppm**) de **O<sub>3</sub>** y (**> 0.01 ppm**) de **SO<sub>2</sub>**,

suprimen la fotosíntesis, mediante la descomposición de la clorofila, así como la actividad cambiante de las enzimas fijadoras de carbono, la tasa de fosforilación y la capacidad de amortiguación del pH (Pallardy & Kozlowski, 2008), esto explica la respuesta en el crecimiento de 25 y 50% RC, los cuales tuvieron un crecimiento por debajo de la media durante 8 años, lo que determina su susceptibilidad a las concentraciones de ( $\text{SO}_2 > 0.01$  ppm y  $\text{O}_3 > 0.015$  ppm).

**Cuadro 12: Concentración de contaminantes atmosféricos ZMCVM vs. Ancho de anillos (mm)**

Año	[SO <sub>2</sub> ] ppm	[NO <sub>x</sub> ] ppm	[O <sub>3</sub> ] ppm	25% RC	50% RC	75% RC	100% RC
1990	0.104	0.104	0.057	1.865	3.384	2.455	3.444
1991	0.116	0.071	0.071	1.710	2.830	2.726	4.486
1992	0.092	0.068	0.066	1.966	2.558	3.084	4.231
1993	0.004	0.088	0.057	2.112	2.963	3.153	4.599
1994	0.028	0.088	0.055	3.447	3.057	2.825	4.343
1995	0.028	0.066	0.054	3.587	3.816	3.480	3.467
1996	0.024	0.080	0.050	2.801	3.486	3.134	4.215
1997	0.021	0.075	0.047	1.682	3.217	3.396	5.272
1998	0.022	0.062	0.047	1.508	2.782	3.812	5.006
1999	0.023	0.047	0.049	2.323	3.949	3.636	4.953
2000	0.020	0.059	0.049	2.588	3.093	4.368	4.481
2001	0.029	0.058	0.036	3.862	3.986	3.544	4.855
2002	0.013	0.041	0.044	4.244	2.735	2.891	5.067
2003	0.014	0.066	0.038	3.371	3.447	2.408	5.164
2004	0.015	0.064	0.033	4.144	2.761	2.925	6.412
2005	0.013	0.063	0.040	4.511	2.459	4.391	5.107
2006	0.008	0.059	0.038	3.767	2.912	4.376	5.093
2007	0.006	0.056	0.037	4.501	3.481	6.859	5.049
2008	0.012	0.056	0.036	3.925	2.628	5.247	5.428
2009	0.005	0.053	0.036	3.342	4.083	5.486	4.431
2010	0.007	0.052	0.032	3.584	2.313	5.096	5.842
2011	0.007	0.051	0.036	4.354	4.544	5.873	5.224
2012	0.008	0.056	0.033	4.121	3.195	5.580	4.592
2013	0.007	0.053	0.034	4.782	2.492	5.274	6.363
2014	0.006	0.051	0.031	3.392	2.303	7.442	4.962
2015	0.007	0.051	0.034	6.907	1.851	9.208	6.458
2016	0.005	0.049	0.037	4.786	1.682	13.807	6.002

Garza & Aragón (1995) mencionan que en los **meses invernales** la **concentración** de **O<sub>3</sub>** se eleva debido a que las **inversiones térmicas** en la atmósfera del Valle de México son **más frecuentes**, por lo que se **dificulta** la **dispersión de contaminantes** y sus **concentraciones** se **elevan**.

Los **niveles críticos** de **O<sub>3</sub>** en la vegetación están establecidos como la **suma** durante las **horas diurnas** entre el **promedio horario** de **concentración** de **O<sub>3</sub>**, en **árboles** el nivel crítico, de acuerdo con Bermejo et al. (2009) es de **5 ppm/h**; debido a que los datos con los que se comparó la presente investigación fueron promedios anuales de concentración de **O<sub>3</sub>**, no se puede observar a simple vista que a pesar de las leyes impuestas en CDMX, este contaminante sigue presente en altas concentraciones (SMA-CDMX, 2018) y genera problemas en la salud forestal del PNDL (Jiménez López, 2019; Salas & Sánchez, 2016; Sánchez Villanueva, 2018).

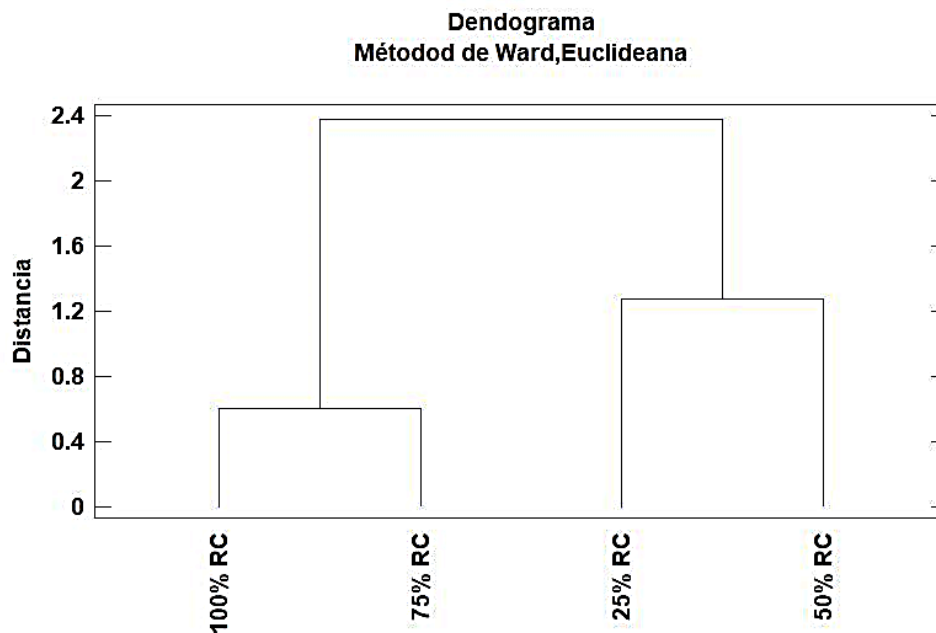
De acuerdo con Smith (1981) los **eventos de alteración o perturbación** en los **ecosistemas forestales** pueden desempeñar **funciones beneficiosas y esenciales** en estos a **largo plazo, maximizando** la **productividad del ecosistema**, por lo que uno de los factores que pudo contribuir a la recuperación en crecimiento de los árboles, fue los eventos de disturbio que ocurrieron en el PNDL tales como la acción de las altas concentraciones de contaminantes atmosféricos (1970—1980), los incendios forestales, manejo forestal inadecuado, plagas de descortezadores (CONANP, 2006) y fuertes vientos que derribaron una gran cantidad de árboles cerca de la zona de muestreo (G. Calva, comunicación personal, 2020).

Sin embargo, es importante considerar que el **daño por ozono en árboles** puede generarse a partir de la **exposición por algunas horas** (Smith, 1981), lo que podría estar generando la **disminución de la vitalidad en las copas** de los árboles del PNDL y con ello su **vigor**, de manera que el **daño** a pesar de generarse a **corto plazo**, es decir, **disminuyendo** las **clorofilas a y b**, se ve **reflejado** en la **composición de las copas a largo plazo**.



El análisis de conglomerados (figura 31) confirma que hay una **relación** en los anchos de anillos de **75 y 100% RC**, así mismo para **25 y 50% RC**, para esta última la relación es un poco más distante. Debido a la ubicación del PNDL en el suroeste de la Ciudad de México, recibe la mayor parte del año altas concentraciones de O<sub>3</sub> provocando un daño en las yemas (apicales y laterales) de las hojas de los árboles y esto a su vez detiene el crecimiento (reflejado en los anillos y en estructuras reproductivas).

Los **árboles** con porcentajes de retención de copa de **25 y 50** fueron los **primeros afectados** por las **emisiones de contaminantes atmosféricos**, pues sus **anillos** disminuyeron durante 6 y 4 décadas, respectivamente, comenzando en **1937 y 1947**, respectivamente. No así para los árboles con **75 y 100% RC** los cuales disminuyeron su crecimiento solo tres décadas, comenzando en **1957**.



**Figura 31: Prueba de asociación entre porcentaje de retención de copa de acuerdo con su ancho de anillos**

Este comportamiento puede explicarse por Wareing (1964) quien menciona que la capacidad total fotosintética de un árbol depende de dos factores: 1) la intensidad fotosintética, es decir, la intensidad a la cual el CO<sub>2</sub> es asimilado en materia orgánica, y 2) la superficie foliar total comprendida en la fotosíntesis; la producción de madera es consecuencia principalmente de la síntesis de la pared celular que se deriva del CO<sub>2</sub> fijado por la fotosíntesis. Así mismo Harold & Hocker (1984) mencionan que “un árbol que posee una copa grande tendrá un área foliar suficiente para que realice una máxima producción fotosintética”.

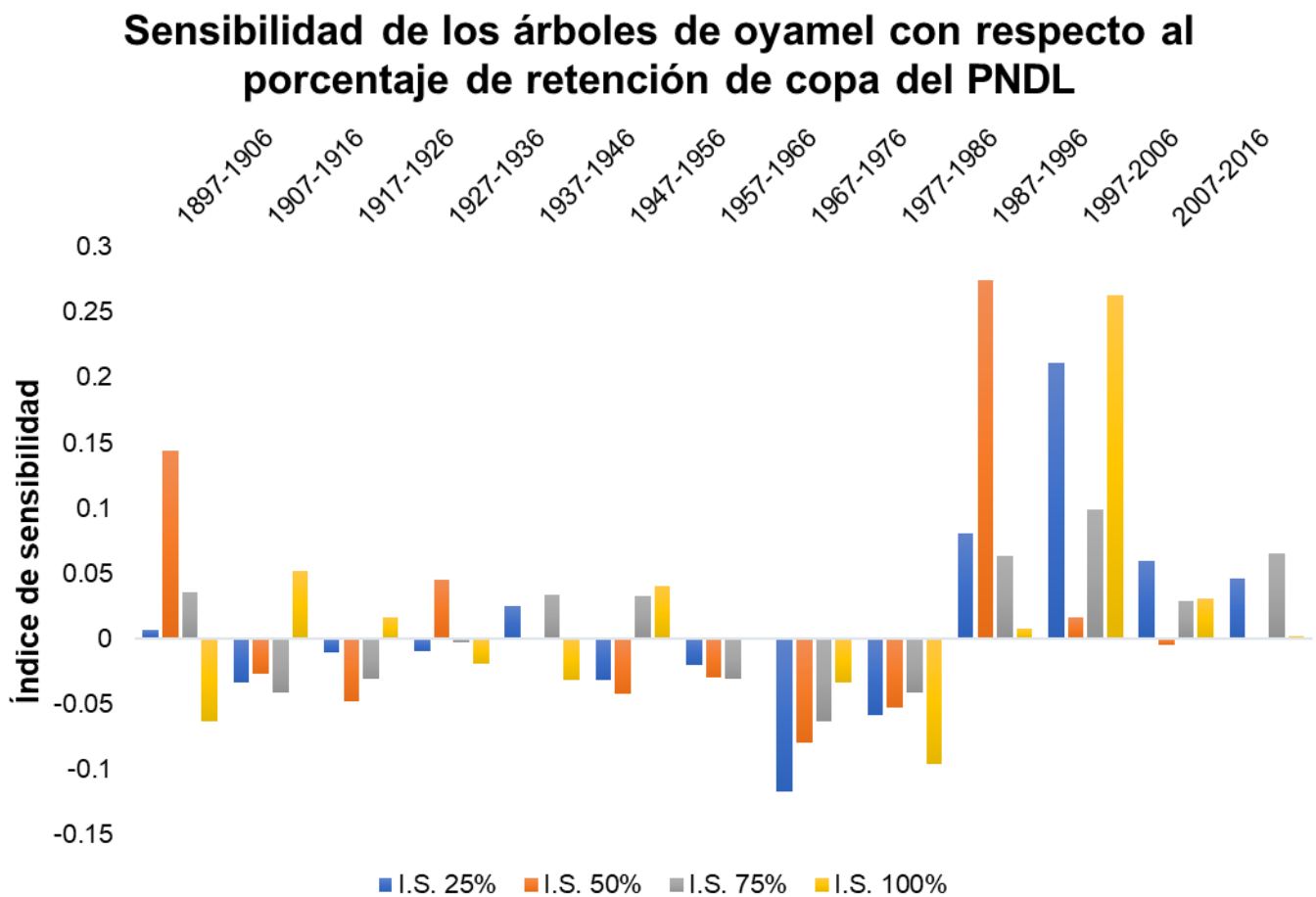


Figura 32: Índice de sensibilidad por década en cada porcentaje de retención de copa

Ejemplo de lo anterior es que en un primer momento el O<sub>3</sub> acelera la senescencia foliar, causa de que los árboles redujeran sus copas, aquellos con copas de menor porcentaje a su vez redujeron la tasa fotosintética, lo que los llevó a disminuir en su crecimiento (25 y 50% RC) y en el caso de 75 y 100% RC tuvieron más resistencia debido a que equilibraron su tasa fotosintética, sin embargo, para 1956 pudo haber una repercusión por parte de este y los otros contaminantes, disminuyendo su masa foliar, lo que llevó a la reducción de su tasa fotosintética y a la vez la asignación de carbohidratos fue mayormente invertida en mantenimiento y reparación (figura 32).

El vigor de las plantas tiene un papel fundamental en la asignación de azúcares dentro de estas para crecimiento y reparación, de acuerdo con Watson (1956, 1958) citado en Wareing (1964) las diferencias en productividad por mejora genética se deben en su mayor parte a un incremento de desarrollo foliar.

### **10.3 Ganancia en crecimiento por cada porcentaje de retención de copa**

Se obtuvo la ganancia en crecimiento de cada porcentaje de retención de copa (cuadro 13). El **promedio de la ganancia en crecimiento** fue similar para cada uno de los porcentajes de retención de copa, con **0.498 mm** para **25%**, **0.499 mm** para **50%**, para **75%** fue de **0.509 mm** y para **100%** de **0.499 mm**.

**Cuadro 13: Ganancia en crecimiento (mm) por década, para cada porcentaje de retención de copa**

Década	25% RC	50% RC	75% RC	100% RC
1877-1886	0.424 ± 0.073		0.464 ± 0.045	0.399 ± 0.100
1887-1896	0.515 ± 0.017	0.387 ± 0.112	0.571 ± 0.062	0.366 ± 0.133
1897-1906	0.436 ± 0.062	0.701 ± 0.202	0.414 ± 0.095	0.577 ± 0.078
1907-1916	0.482 ± 0.015	0.450 ± 0.050	0.441 ± 0.068	0.523 ± 0.024
1917-1926	0.485 ± 0.012	0.404 ± 0.095	0.496 ± 0.013	0.469 ± 0.029
1927-1936	0.535 ± 0.037	0.572 ± 0.073	0.546 ± 0.037	0.452 ± 0.046
1937-1946	0.453 ± 0.045	0.498 ± 0.001	0.551 ± 0.042	0.556 ± 0.057
1947-1956	0.472 ± 0.025	0.428 ± 0.071	0.445 ± 0.064	0.501 ± 0.002
1957-1966	0.369 ± 0.129	0.457 ± 0.042	0.398 ± 0.111	0.450 ± 0.049
1967-1976	0.451 ± 0.047	0.410 ± 0.089	0.451 ± 0.058	0.379 ± 0.120
1977-1986	0.551 ± 0.053	0.454 ± 0.046	0.561 ± 0.052	0.507 ± 0.009
1987-1996	0.652 ± 0.154	0.718 ± 0.218	0.607 ± 0.098	0.742 ± 0.243
1997-2006	0.568 ± 0.070	0.521 ± 0.022	0.544 ± 0.035	0.557 ± 0.059
2007-2016	0.576 ± 0.078	0.492 ± 0.007	0.637 ± 0.127	0.505 ± 0.006
<b>Promedio total</b>	<b>0.498</b>	<b>0.499</b>	<b>0.509</b>	<b>0.499</b>

De las **catorce décadas** en las que se dividieron las **cronologías**, el **25 y 50% RC** tuvieron **ganancias por debajo de la media (0.498 y 0.499 mm, respectivamente)** durante **8 y 9 décadas**, respectivamente, para el **75 y 100%**, durante **7 y 6 décadas**, respectivamente, sus **ganancias** estuvieron por **debajo de la media (0.509 y 0.499 mm, respectivamente)**.

Las décadas que coinciden con menor ganancia en crecimiento para todos los porcentajes de retención de copa fueron: **1917—1926, 1957—1966 y 1967—1976**, la primera concuerda con una de las etapas de sequías más frecuentes y severas en el país, y las últimas dos con el período de mayor concentración de contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México. Con las incertidumbres los registros son similares.

Así la concentración promedio de los gases ozono, óxidos de nitrógenos y dióxido de azufre (cuadro 14), durante las ganancias no muestran claramente una diferencia con respecto a

las categorías de retención de copa. Durante los treinta años no son contundentes los resultados entre el porcentaje de copa y la ganancia, aunque si para las décadas.

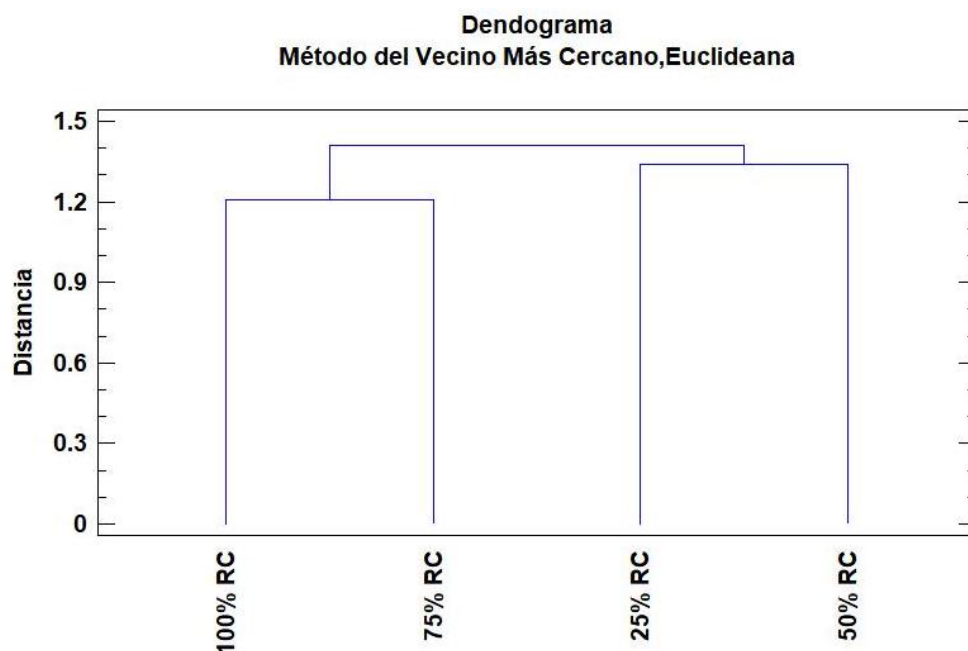
**Cuadro 14: Relación del registro de los contaminantes atmosféricos con la ganancia (promedio por década)**

Década	O <sub>3</sub> (ppm)	NO <sub>x</sub> (ppm)	SO <sub>2</sub> (ppm)	25% RC	50% RC	75% RC	100% RC
1987-1997	0.0586	0.0807	0.0566	0.652 ± 0.154	0.718 ± 0.218	0.607 ± 0.098	0.742 ± 0.243
1997-2006	0.0421	0.0594	0.0178	0.568 ± 0.070	0.521 ± 0.022	0.544 ± 0.035	0.557 ± 0.059
2007-2016	0.0346	0.0528	0.0070	0.576 ± 0.078	0.492 ± 0.007	0.637 ± 0.127	0.505 ± 0.006
Promedio	0.0451	0.0643	0.0271	0.599	0.577	0.596	0.601

Los valores de ganancia en crecimiento coincidieron con las etapas de disminución de crecimiento de los anillos y con la etapa donde los árboles incrementaron su crecimiento, demostrando un comportamiento similar.

Así mismo, se pudo observar que la recuperación en la ganancia de crecimiento comenzó para todos los porcentajes de retención de copa en la década de **1977—1986**, sin embargo, el incremento se vio mayormente favorecido a partir de la década de **1987—1996**.

De igual forma que en la tendencia de crecimiento de los anillos por porcentaje de retención de copa, el análisis de conglomerados (figura 33) confirmó que existe una **relación** de **75% y 100% RC**, y entre **25 y 50% RC** en lo que respecta a la **ganancia en crecimiento**, las **distancias** de ambos grupos fueron **similares** entre sí. **Sin embargo**, con relación al porcentaje de copa y anchos de anillos, fue necesario analizar por la métrica de varianza, a través de ella se determinó que hay diferencia para los porcentos 50 y 100 de los anchos respecto a 25 y 75% (cuadro 15).



**Figura 33: Prueba de asociación entre porcentaje de retención de copa y ganancia en crecimiento**

**Cuadro 15: ANOVA para la ganancia en crecimiento de cada porcentaje de retención de copa**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Ganancia 25%	14	6.9692445	0.497803179	0.005419764		
Ganancia 50%	13	6.493003898	0.499461838	0.01126136		
Ganancia 75%	14	7.126947363	0.509067669	0.005565068		
Ganancia 100%	14	6.98227911	0.498734222	0.009223211		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.001151992	3	0.000383997	0.049225371	0.985384008	2.786228813
Dentro de los grupos	0.397840881	51	0.007800802			
Total	0.398992873	54				

## 10.4 Índice de sensibilidad por porcentaje de retención de copa

Para poder conocer la variabilidad en el crecimiento de los anillos, se determinó el índice de sensibilidad de estos por cada porcentaje de retención de copa (cuadro 16), el **índice de sensibilidad promedio para cada porcentaje de retención de copa fue similar en 25%**

**(0.011)**, **75% (0.011)** y **100% (0.012)**, no así para el **50% RC** que fue de **(0.016)**. En lo que respecta al I.S. total (sumatoria) el comportamiento fue similar, de acuerdo a lo descrito por Vogt et al. (s. f.), el **50% y 100% RC** fueron los que tuvieron los **árboles más sensibles**, con un valor de **0.192 y 0.167**, respectivamente, en cuanto a los porcentajes de retención de copa de **25 y 75**, **fueron árboles con menor susceptibilidad a cambios**, teniendo el valor de **0.147**.

En el cuadro 16 se puede observar que el índice de sensibilidad fue variable y su tendencia concuerda con la tendencia de la ganancia en crecimiento, lo cual indica que el oyamel no es una especie complaciente y responde a los cambios exógenos, de acuerdo con Fritts (1976) a mayor limitación del árbol por factores ambientales, hay mayor variación en el ancho de los anillos.

Los índices de sensibilidad que estuvieron por debajo de la media de cada porcentaje de copa, y coincidieron en los mismos años para todos, pertenecieron a las décadas **1917—1926**, **1947—1956**, **1957—1966** y **1967—1976**, lo cual indica que los cambios en los factores ambientales del Parque Nacional Desierto de los Leones generaron una respuesta en el oyamel.

En el cuadro 17 las varianzas del índice de sensibilidad muestran una fluctuación en la respuesta de los árboles ante los cambios en el entorno, se puede observar que la varianza en el 50% RC es propia de árboles que se vuelven más susceptibles a dichos cambios, reparando y manteniendo las estructuras dañadas, intentando sobrevivir a los efectos de los cambios en los factores ambientales.

**Cuadro 16: Índice de sensibilidad (I.S.) por década, para cada porcentaje de retención de copa**

Década	I.S. 25%	I.S. 50%	I.S. 75%	I.S. 100%
1887-1896	0.007 ± 0.005		0.036 ± 0.024	-0.064 ± 0.077
1897-1906	-0.034 ± 0.045	0.144 ± 0.128	-0.041 ± 0.052	0.052 ± 0.039
1907-1916	-0.010 ± 0.022	-0.027 ± 0.043	-0.031 ± 0.043	0.016 ± 0.003
1917-1926	-0.010 ± 0.021	-0.048 ± 0.064	-0.003 ± 0.014	-0.019 ± 0.032
1927-1936	0.024 ± 0.013	0.045 ± 0.028	0.034 ± 0.022	-0.031 ± 0.044
1937-1946	-0.032 ± 0.043	-0.001 ± 0.017	0.032 ± 0.021	0.040 ± 0.027
1947-1956	-0.020 ± 0.031	-0.042 ± 0.058	-0.031 ± 0.042	0.000 ± 0.012
1957-1966	-0.117 ± 0.129	-0.030 ± 0.046	-0.064 ± 0.075	-0.033 ± 0.046
1967-1976	-0.059 ± 0.070	-0.080 ± 0.096	-0.042 ± 0.053	-0.096 ± 0.109
1977-1986	0.081 ± 0.069	-0.053 ± 0.069	0.063 ± 0.052	0.008 ± 0.005
1987-1996	0.212 ± 0.200	0.274 ± 0.258	0.099 ± 0.088	0.263 ± 0.250
1997-2006	0.060 ± 0.048	0.016 ± 0.000	0.029 ± 0.018	0.031 ± 0.018
2007-2016	0.046 ± 0.035	-0.005 ± 0.021	0.066 ± 0.054	0.002 ± 0.011
<b>Sumatoria</b>	<b>0.146</b>	<b>0.192</b>	<b>0.146</b>	<b>0.167</b>
<b>Promedio total</b>	<b>0.011</b>	<b>0.016</b>	<b>0.011</b>	<b>0.012</b>

**Cuadro 17: ANOVA para las variables de índice de sensibilidad**

Análisis de varianza de un factor						
RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
I.S. 25%	13	0.146505964	0.01126969	0.006331695		
I.S. 50%	12	0.19281625	0.016068021	0.010010681		
I.S. 75%	13	0.146621961	0.011278612	0.002516966		
I.S. 100%	13	0.167664037	0.012897234	0.007376464		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.000188804	3	6.29346E-05	0.009703875	0.998670399	2.802355176
Dentro de los grupos	0.304818988	47	0.00648551			
Total	0.305007791	50				

Como se mencionó anteriormente las tendencias entre índice de sensibilidad y ganancia en crecimiento por porcentaje de retención de copa fueron similares, es decir, las décadas donde las ganancias en crecimiento incrementaron, el índice de sensibilidad también lo hizo (figura 34 y 35).



Una tendencia similar entre la ganancia en crecimiento y el índice de sensibilidad está reportada en la investigación de Carrillo Mata (2017) en la cual se puede observar que cuando la ganancia en crecimiento disminuye, el índice de sensibilidad disminuye también y cuando la ganancia en crecimiento aumenta, el índice de sensibilidad también.

Esto concuerda con lo descrito por Vogt et al. (s. f.), cuando el crecimiento disminuye, la capacidad de respuesta del árbol disminuye ante los cambios en su entorno y cuando el crecimiento aumenta, la capacidad del árbol de responder a cambios exógenos aumenta.

En este sentido, cuando el árbol disminuye su crecimiento, es porque a nivel fisiológico está sufriendo cambios internos que le están generando un daño, por lo que su capacidad de respuesta se encuentra enfocada en reparar estos, y por ello su capacidad de respuesta ante cambios en el entorno disminuye. Por otro lado, cuando el crecimiento se ve favorecido, es porque a nivel fisiológico el árbol se encuentra en un estado de complacencia, por lo que su capacidad de responder a cambios exógenos aumenta.

En décadas donde los árboles disminuyeron su ganancia en crecimiento, los efectos de las variables exógenas dañaron al árbol a nivel interno, tal que el árbol se volvió más sensible a este daño, enfocando su respuesta en mantener y reparar las zonas dañadas; contrario para las décadas en las que los árboles aumentaron su ganancia en crecimiento, debido al estado de complacencia en el que se encontraban a nivel interno, su respuesta estuvo enfocada en los cambios de su entorno.

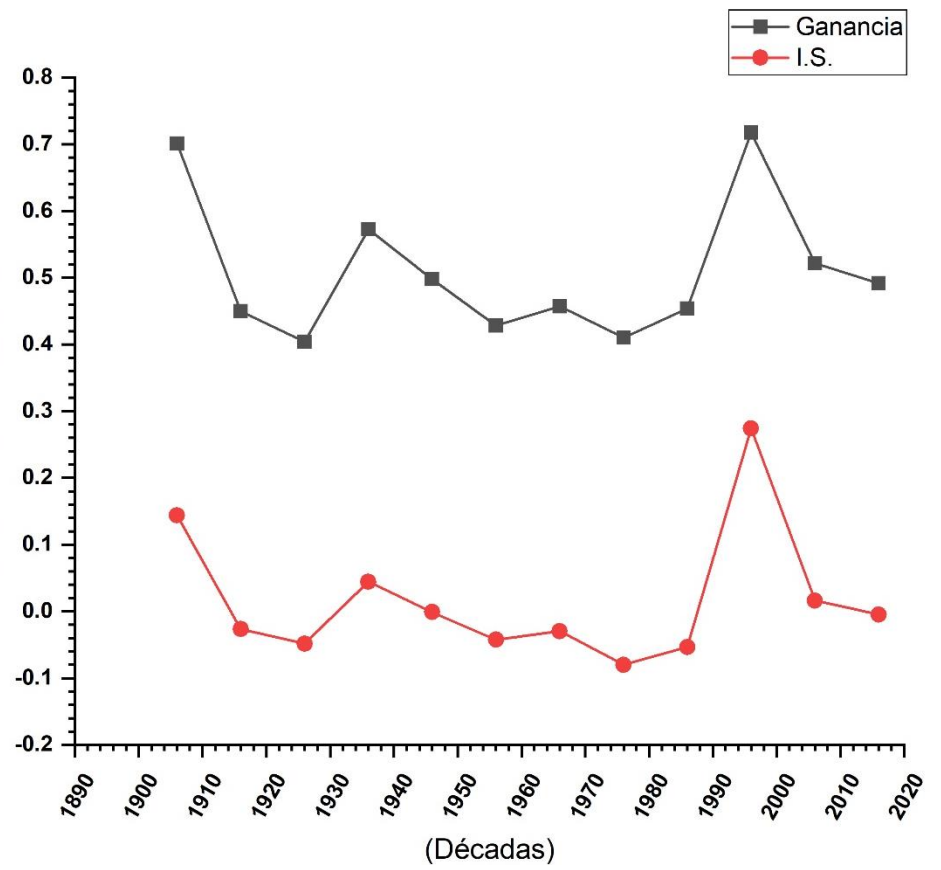
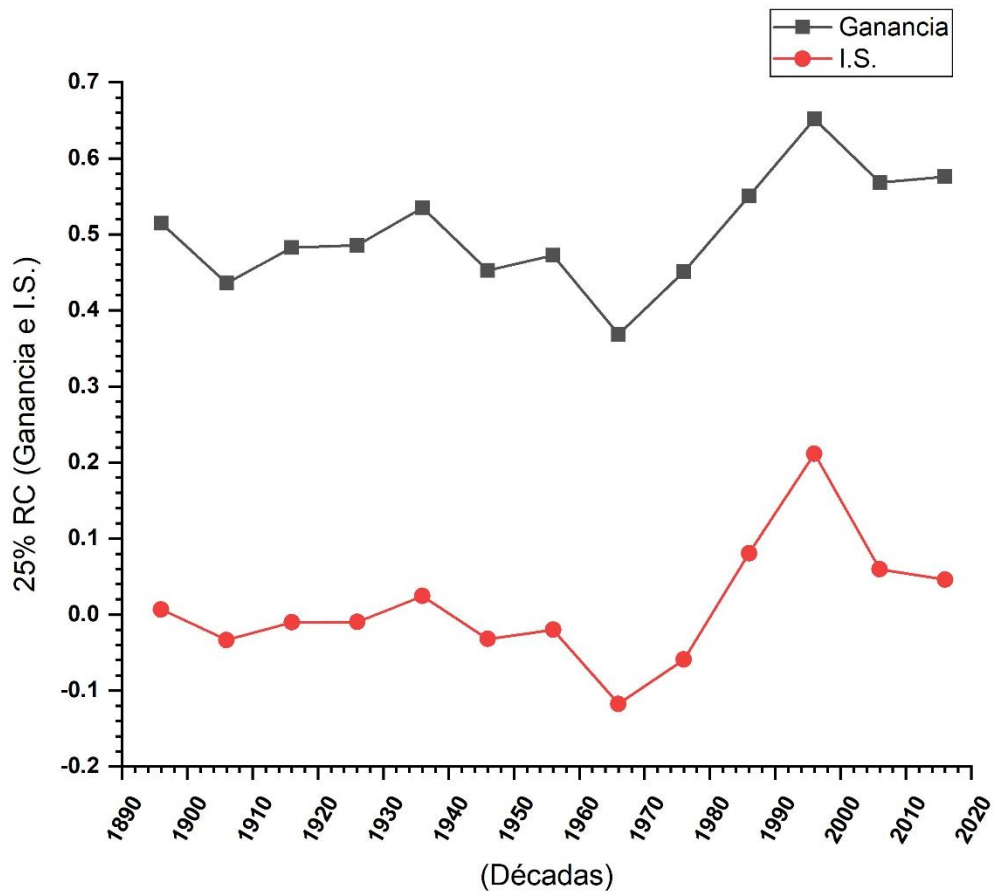


Figura 34: Tendencia en índice de sensibilidad vs. ganancia en crecimiento (25 y 50% RC)

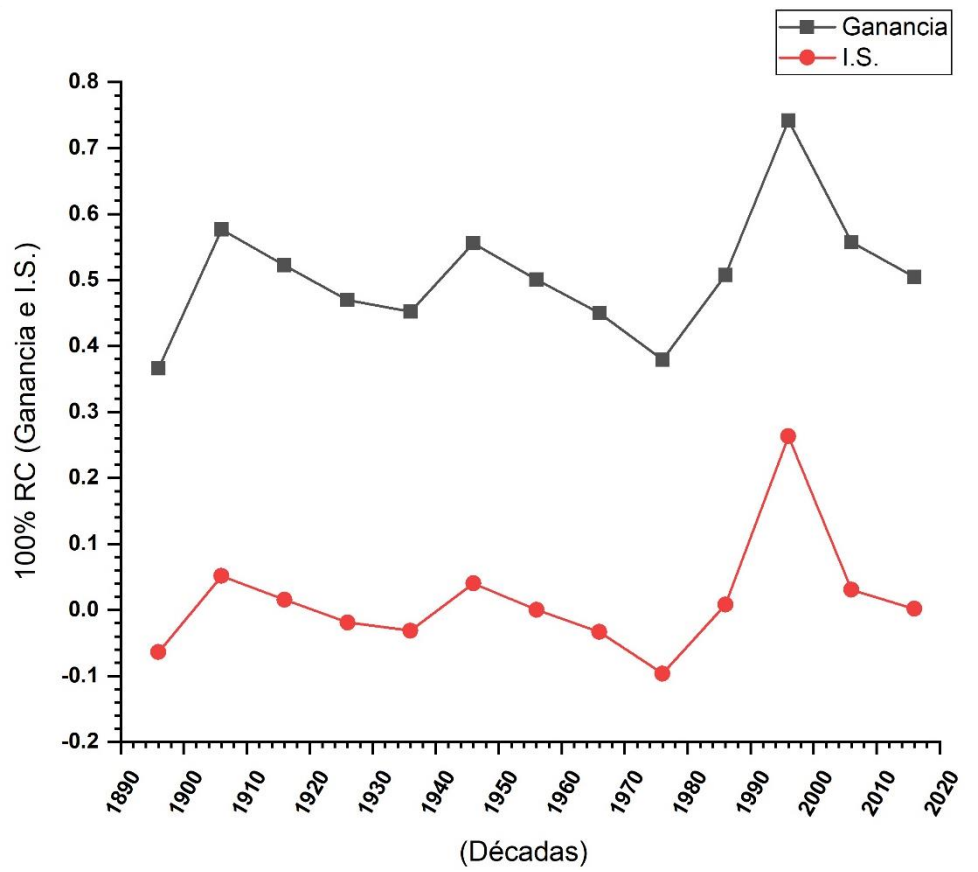
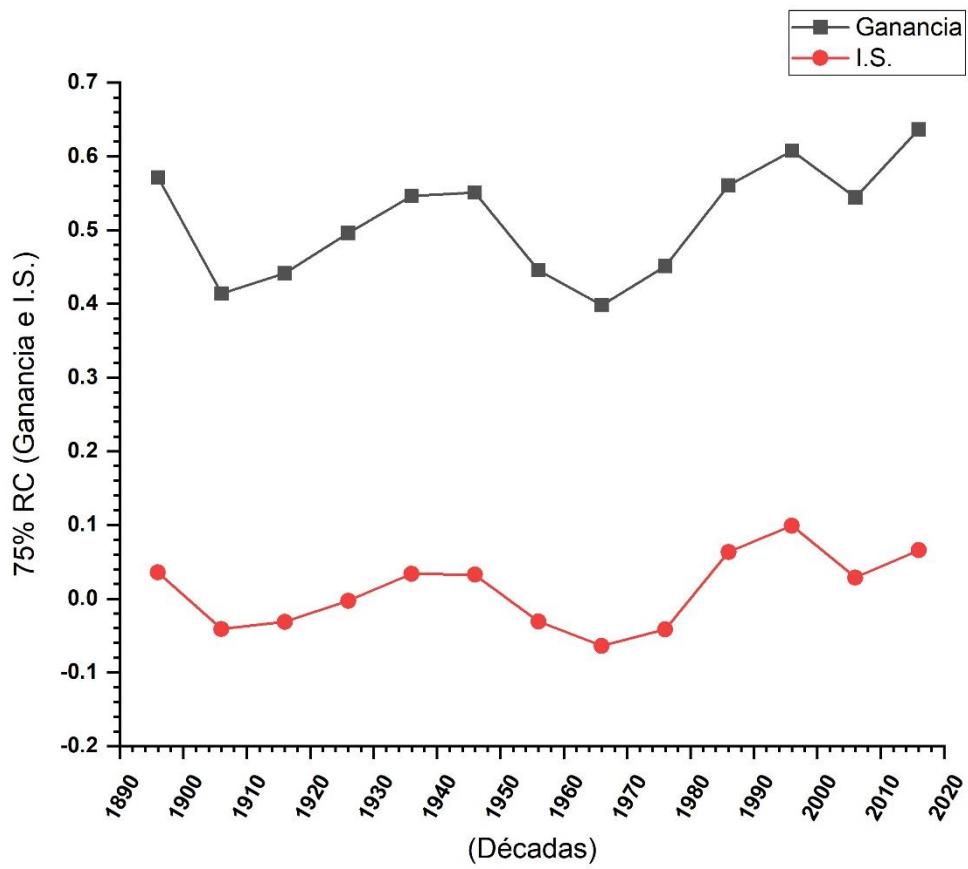


Figura 35: Tendencia en índice de sensibilidad vs. ganancia en crecimiento (75 y 100% RC)

## 10.5 Porcentaje de retención de copa vs. crecimiento de anillos

En el cuadro 18 se representa la media de ancho de anillo para cada porcentaje de retención de copa, los **anchos de anillo más delgados** corresponden al **25 y 50% RC**, con **2.761 y 2.783 mm**, así también, los anchos con copa del **75 y 100% fueron los mayores** con **3.134 y 3.106 mm**, respectivamente. La plantilla de daño en copa (RED II), no podría usarse en este diseño experimental, debido a que privilegia la cuantificación de transparencia y daño acicular (clorosis), evaluando el efecto por ozono. Finalmente, los valores múltiples de 10% de daño de copa es un criterio definido para transparencia de copa, que también constituye otra forma de evaluar vitalidad, la comunidad europea la denominó índice de daño por ozono (Anexo 2).

**Cuadro 18: Prueba de rangos múltiples de media (método: LSD con 95% de confianza)**

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
<b>RC 25%</b>	151	2.761	X
<b>RC 50%</b>	148	2.783	X
<b>RC 100%</b>	150	3.106	X
<b>RC 75%</b>	150	3.134	X

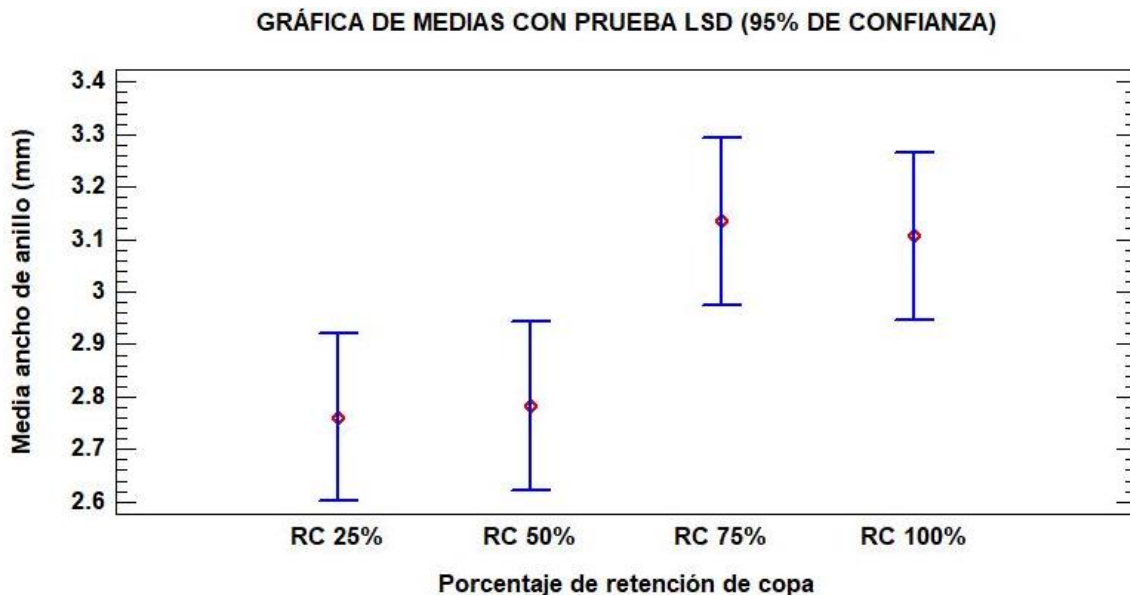
El cuadro 19 muestra la prueba de homogeneidad entre los grupos de porcentajes de retención de copa, destacando que 25 y 50% RC mostró homogeneidad entre ellos, y también para el 75 y 100% RC. Por otro lado, hay diferencias significativas entre los grupos, lo que indica que el crecimiento del oyamel en árboles con 25 y 50% de retención de copa se ve mermado por el estado de salud del árbol, en comparación con los árboles de 75 y 100% RC.

**Cuadro 19: Prueba de rangos múltiples con su significancia y límites**  
(método: LSD 95%; \* indica una diferencia significativa)

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
RC 25% - RC 50%		-0.0218553	0.319327
RC 25% - RC 75%	*	-0.373518	0.31825
RC 25% - RC 100%	*	-0.345784	0.31825
RC 50% - RC 75%	*	-0.351663	0.319853
RC 50% - RC 100%	*	-0.323929	0.319853
RC 75% - RC 100%		0.027734	0.318778

Gráficamente lo anterior queda representado en la diferencia de medias (figura 36), los intervalos de ancho de anillos de 25 y 50% RC no tuvieron diferencia significativa entre sí, sus anillos oscilan entre 2.60—2.92 mm y 2.62—2.94 mm, respectivamente, por otro lado, con un 95% de confianza fueron significativamente diferentes con respecto a 75 y 100% RC. Estos últimos no tuvieron diferencia significativa entre sí, presentando valores de entre 2.98—3.30 mm y 2.95—3.70 mm, respectivamente.

El cuadro 20 confirma que el valor de P es menor al error ( $\alpha=0.05$ ), lo que corrobora la diferencia significativa que existe entre 25 y 50% RC, respecto al grupo de 75 y 100% RC.



**Figura 36: Gráfica de diferencia de medias de ancho de anillo entre porcentajes de retención de copa**

**Cuadro 20: Tabla ANOVA de las medias de ancho de los anillos**

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	18.3156	3	6.10521	3.09	0.0267
Intra grupos	1175.68	595	1.97593		
Total (Corr.)	1193.99	598			

Distintas investigaciones coinciden en que existe un efecto de las copas en el crecimiento de los anillos de árbol, cuando estas se encuentran dañadas o en decline severo, hay una disminución en su crecimiento, a continuación, se describe la similitud que tuvieron dichos estudios con la presente investigación:

Zarnoch et al. (1994) dividieron los árboles de *Pinus echinata* Mill del Bosque Nacional Sumter en Carolina del Sur en tres tipos de vigor, concluyendo que los de buen vigor tuvieron mayor crecimiento de área basal anual (1.48—2.60mm), a diferencia de los árboles con vigor medio y vigor pobre, para los cuáles el crecimiento de área basal anual osciló entre 1.02—1.76 y 0.65—1.39 mm, respectivamente, en cronologías de 1974—1990.

Dwyer et al. (1995) concluyeron para los robles (*Quercus velutina* Lam. y *Quercus cocinea* Muenchh.) de Missouri, que el crecimiento en árboles sanos (muerte de copa < 30%) fue mayor a diferencia de los árboles declinados (muerte de copa > 30%), con un intervalo de 2.9—5.5 mm y 1.6—5.1 mm, respectivamente.

Duchesne et al. (2003) en su investigación de *Acer saccharum* Marsh. en Quebec, concluyeron que a partir del 10% de daño en copa, hubo una disminución significativa en el crecimiento de los árboles declinados en los años 1955—1989, detectando un decremento en las cronologías, para la categoría de decline entre 10—29% la disminución fue de 0.057 mm, para 30—49% y 50—100% de decline, las disminuciones en crecimiento oscilaron entre 0.075 y 0.079 mm, respectivamente.

Bigler et al. (2004) dividieron a los árboles de *Abies alba* Mill. de Eslovenia en árboles sanos, árboles declinados y árboles recientemente muertos, para los cuales los crecimientos oscilaron entre 1.49—4.48, 0.04—3.40 y 0.01—3.42 mm, respectivamente, en un período de tiempo de 1830—2001, concluyendo que los árboles sanos tuvieron mayor crecimiento.

Drobyshev et al. (2007) dividieron árboles de *Quercus robur* L. del sur de Suecia en tres tipos, árboles con copas sanas, árboles con copas moderadamente declinadas y árboles con copas severamente declinadas, al hacer una comparación de crecimiento en dos períodos de tiempo (1993—1997 y 1998—2002), los crecimientos oscilaron entre 1.056—1.172, 0.957—1.022 y 0.758—0.948 mm, respectivamente, concluyendo que los árboles de copas sanas incrementaron su crecimiento, los de copas moderadamente declinadas se mantuvieron en una tasa similar de crecimiento y los de copas severamente declinadas tuvieron un descenso en el crecimiento.

Manzano-Méndez et al. (2010) concluyeron que las diferentes calidades de copa influyeron en las oscilaciones de crecimiento promedio anual en diámetro, siendo de 10.348—31.108 mm para árboles con calidad de copa buena, de 5.092—13.535 para árboles con calidad de copa regular y de 2.990—7.668 para árboles con calidad de copa deficiente, de *Zanthoxylum kelermanii* P. Wilson en Oaxaca, México.

Matisons et al. (2016) realizaron una investigación con *Fraxinus excelsior* L. en la parte este de Letonia en cuatro lugares distintos, concluyendo que había diferencias en el crecimiento promedio de anillos entre árboles con copas sanas y árboles con copas dañadas, en Barkava fue de 2.53 mm y 1.99 mm, respectivamente, en Gulbene fue de 1.48 mm y 1.38 mm, respectivamente, en Rundāle fue de 2.05 mm y 1.79 mm, respectivamente, y en Ukri fue de 1.99 mm y 1.65 mm, respectivamente.

Así mismo, Alvarado R. et al. (1993), Acosta-Montoya (1998) y Bernal-Salazar et al. (2002), concluyen que para los árboles de *A. religiosa* del PNDL, el efecto por ozono incrementa

la senescencia foliar, por lo que la copa disminuye y esto a su vez reduce la biomasa del tronco de los árboles, lo cual se vio reflejado en los árboles con porcentaje de retención de copa de entre 25 y 50%.

Por otro lado, algunos estudios concluyen que los síntomas visibles en los árboles aparecen mucho después de que los contaminantes atmosféricos generan cambios en las tasas de fotosíntesis y a su vez en el crecimiento de los árboles (Pallardy & Kozlowski, 2008; Smith, 1981), lo que podría ser una explicación de la disminución de crecimiento de 25 y 50% de retención de copa, durante 8 y 6 décadas, respectivamente, de las 14 que abarcó la cronología.



**Figura 37: Estado de la copa de oyamel del paraje Casa de Piedra**



## 11. CONCLUSIONES

- La cronología general abarco un período de 150 años (1866—2016) teniendo un declive en el crecimiento durante 50 años a causa de distintos cambios en las condiciones ambientales de la CDMX.
- En un intervalo de 5 a 8 décadas de 14 en las que se dividieron las cronologías, el crecimiento fue menor a 2.630 (media), 8 décadas para 25% RC, 6 décadas para 50% RC y, 5 décadas para 75 y 100% RC, atribuyéndolo a la susceptibilidad de los cambios en el entorno, combinación de sequía y contaminación del aire.
- Los menores grosores de anillo registrados concuerdan con las décadas de mayor contaminación del aire en la Ciudad de México; la fotosíntesis se reduce en las copas de las categorías 25 y 50% donde los anillos muestran un descenso a partir de la década de 1947—1956; diez años después en las categorías 75 y 100% disminuyeron los anillos durante la década de 1957—1966, extendiéndose hasta la década 1977—1986 para todas.
- No hubo diferencia significativa en cuanto a las ganancias entre cada categoría de retención de copa, sin embargo, la tendencia en ganancia y ancho de anillo fue proporcional.
- El índice de sensibilidad arrojó que existe mayor susceptibilidad a los cambios del entorno cuando el árbol aumenta su crecimiento, contrario a cuando este disminuye.
- La prueba de diferencia de medias confirmó que las medias de ancho de anillo de 25 y 50% de retención de copa fueron diferentes a las de 75 y 100%, existiendo una diferencia significativa entre las categorías 25 y 50% respecto a las categorías 75 y 100%. En los árboles que perdieron la copa hasta los niveles del 25 % y 50%, la declinación ya no se detiene, por lo que el árbol morirá.
- Se aporta la evidencia de un efecto positivo en el crecimiento de los árboles cuando el porcentaje de retención de copa es de 75 y 100%, contrario para los árboles con 25 y 50% de retención de copa.

## **12. PERSPECTIVAS Y/O RECOMENDACIONES**

- Un estudio donde se contemplen las horas con concentraciones de ozono mayores a la NOM por hora (entre 12 y 18 hrs.), promediándolas por día y a su vez por año, y compararlas con los anchos de los anillos, crearía un panorama más claro de que la salud forestal aún está amenazada por las altas concentraciones de dicho contaminante.
- Se sugiere un aumento de muestreo para cada porcentaje de retención de copa con el fin de disminuir los intervalos del Análisis de Varianza.

### 13. REFERENCIAS

- Acosta-Montoya, J. (1998). *Comportamiento de la distribución de biomasa en brinzales de Abies religiosa (H.B.K.) Schl. Et Cham. En declinación* [Licenciatura]. Universidad Autónoma de Chapingo.
- Alanis Méndez, J. L., Arrechea González, G., Hartasánchez Herrera, I. E., Montes de Oca Aguilar, O. G., Navarro Santos *algunas características de la estructura poblacional del venado «cola blanca» (Odocoileus virginianus mexicanus) en el período sept.-nov. De 1980, en el Parque Nacional «Desierto Olvido*, A., Olivia Moscoso, E. A., & Sol Corzo, D. (1980). *Evaluación y consideraciones sobre de los Leones»* (p. 24) [Reporte de investigación]. UAM.
- Alarcón, M. A., de Bauer, Ma. L. I., Jasso, J., Segura, G., & Zepeda, E. M. (1993). Patrón de crecimiento radial en árboles de *Pinus hartwegii* afectados por contaminación atmosférica en el suroeste del Valle de México. *Agrociencia*, 3, 76-80.
- Alvarado, D., de Bauer, L., & Galindo, J. A. (1991). Declinación y muerte de bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Valle de México. *Agrociencia, serie Recursos Naturales Renovables*, 3, 123-143.
- Alvarado R., D., de Bauer, L. I., & Galindo A., J. (1993). Decline of sacred fir (*Abies religiosa*) in a forest park south of Mexico City. *Environmental Pollution*, 80(2), 115-121.
- Alvarado-Rosales, D, Hernández-Tejeda, T., de Bauer, L. I., & Galindo-Alonso, J. (1987). *Declinación y muerte del bosque de oyamel en el sur del Valle de México: Síntomas, desarrollo y posibles causas*. 72.
- Alvarado-Rosales, D. (1989). *Declinación y muerte del bosque de oyamel (Abies religiosa) en el sur del Valle de México* [Maestría en Ciencias]. Colegio de Postgraduados.
- Alvarado-Rosales, D., Equihua-Martínez, A., López-Gómez Tagle, E., Rodríguez-Ortega, A., Saavedra-Romero, L. de L., & Vanegas-Rico, J. M. (2007). Situación actual de la declinación del oyamel en el parque Desierto de los Leones, D.F. *Memoria del XIV Simposio Nacional de Parasitología Forestal*, 24-28.
- Alvarado-Rosales, D. & Hernández-Tejeda, T. (2002). 10. Decline of Sacred Fir in the Desierto de los Leones National Park. En Mark E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City Air Basin* (pp. 254-256). Springer.
- Alvarez, D., Laguna, G., & Rosas, I. (1998). Macroscopic and microscopic symptoms in *Abies religiosa* exposed to ozone in a forest near Mexico City. *Environmental Pollution*, 103(2-3), 251-259.

- Álvarez-Camarena, D. E. (1996). *Determinación de alteraciones a nivel citológico e histoquímico en Abies religiosa (H.B.K.) Schl et Cham del Desierto de los Leones del D.F. y su relación con el ozono* [Maestría en Ciencias]. UNAM.
- College Dictionary. (1993). *Vitalidad* (3a ed.). Houghton Milton Company.
- Amthor, J. S. (1989). *Respiration and Crop Productivity*. Springer-Verlag.
- Anekonda, T. S., Criddle, R. S., Libby, W. J. y Hansen, L. D. (1993). Spatial and temporal relationships between growth traits and metabolic heat rates in coast redwood. *Can. J. For. Res.* 23, 1793–1798.
- Anekonda, T. S., Criddle, R. S., Libby, W. J., Breidenbach, R. W. y Hansen, L. D. (1994). Respiration rates predict differences in growth of coast redwood. *Plant, Cell Environ.* 17, 197–203.
- Arce Alarcón, N. L., & García Hernández, Y. (1990). *Estudio de la corteza del árbol como indicador de contaminación por la lluvia ácida en el parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones* (p. 50) [Servicio Social]. UAM.
- Augustaitis, A., Augustaitiene, I. y Deltuvas, R. (2007). Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Crown Defoliation in Relation to the Acid Deposition and Meteorology in Lithuania. *Water Air Soil Pollut.* 182, 335-348.
- Barnes, R. L. (1972). Effects of chronic exposure to ozone on photosynthesis and respiration of pines. *Environmental Pollution*, 3, 133-138.
- Benavides-Meza, H. M., Gazca Guzmán, M. O., López López, S. F., Camacho Morfín, F., Fernández Grandizo, D. young, de la Garza López de Lara, M. del P., & Nepamuceno Martínez, F. (2011). Variabilidad en el crecimiento de plántulas de ocho procedencias de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schlecht. Et Cham., en condiciones de vivero. *Madera y Bosques*, 17(3), 83-102.
- Bermejo, V., Alonso, R., Elvira, S., Rábago, I., & García, M. (2009). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación* (pp. 60-61). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Bernal-Salazar, S. y Terrazas-Salgado, T. (2000). Influencia climática sobre la variación radial de caracteres anatómicos de madera en *Abies religiosa*. *Madera y Bosques*, 6(1), 73-86.
- Bernal-Salazar, S. y Terrazas-Salgado, T. (2002). Pollution effects on wood anatomical features in *Abies religiosa* (H.B.K.) Schdl. Et Cham. En Mark E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City Air Basin* (pp. 261-282). Springer.
- Bernal-Salazar, S., Terrazas-Salgado, T. y Alvarado, D. (2002). Wood anatomical characters and annual ring width of *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham. Trees comparing two forest with contrasting health characteristics. En Mark E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.)

- Urban air pollution and forests. Resources at risk in the Mexico City Air Basin* (pp. 272-276). Springer.
- Bigler, C., Gricar, J., Bugmann, H., & Cufar, K. (2004). Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir. *Forest Ecology and Management*, 199, 183-190.
- Brang, P. (1998). *Sanasilva-Bericht 1997. Gesundheit und Gefährdung des Schweizer Waldes—Eine Zwischenbilanz nach 15 Jahren Waldschadenforschung*. Berichte der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- Bravo-Alvarez, H., & Torres-Jardón, R. (2002). 6. Air Pollution Levels and Trends in the Mexico City Metropolitan Area. En Mark E. Fenn, L. I. de Bauer, & T. Hernández-Tejeda (Eds.), *Urban Air Pollution and Forests* (pp. 121-159). Springer.
- Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft (Ed.). (1998). *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests*. BFH.
- Burley, J., Evans, J., & Youngquist, J. A. (Eds.). (2004). *Encyclopedia of forest sciences* (1ra ed.). British Library.
- Calva, G. (2012). *Dendroquímica en estudios ecológicos y ambientales*. Editorial Academia Española.
- Camarero, J. J., Sangüesa, G., Alla, A. Q., González de Andrés, E., Maestro, M., & Vicente, S. M. (2012). Los precedentes y las respuestas de los árboles a sequías extremas revelan los procesos involucrados en el decaimiento de bosques mediterráneos de coníferas. *Ecosistemas*, 21(3), 22-30.
- Cantoral Herrera, M. T. (1986). *Comunidades liquénicas epífitas en Abies religiosa (H.B.K.) Cham & Schl. Como indicadores de contaminación atmosférica en el parque Cultural y Recreativo Desierto de los Leones* [Tesis de Licenciatura]. UNAM.
- Carrillo Mata, Y. (2017). *Estimación del almacenamiento de carbono de Abies religiosa en Suelo de Conservación de la Ciudad de México utilizando ecuaciones alométricas y dendrocronología*. UNAM.
- Cibrián, T. D., Méndez-Montiel, J. T., Campos-Bolaños, R., Yates III, H. O., & Flores-Lara, J. (1995). *Insectos Forestales de México/Forest Insects of Mexico*. Universidad Autónoma de Chapingo. SARH Subsecretaría Forestal y de Fauna Silvestre México. USDA Forest Service, Natural Resources Canada. Comisión Forestal de América del Norte FAO.
- Cibrián-Tovar, D. (1989). Air pollution and forest decline near Mexico City. *Environmental Monitoring and Assessment*, 12(1), 49-58.
- Ciesla, W. M., & Macías-Sámano, J. E. (1987). Desierto de los Leones: A forest in crisis. *American forests*, 93(11/12), 29-31
- CONAFOR. (2003). *Abies religiosa (Kunth Schltdl. Et Cham.)*.

- CONANP. (2006). *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Desierto de los Leones* (Primera). CONANP-SEMARNAT.
- Contreras Servín, C. (2005). Las sequías en México durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*, 56, 118-133.
- Cook, E., Briffa, K., Shiyatov, S., Mazepa, V., & Jones, P. D. (1992). Chapter 3. Data Analysis. En E. R. Cook & L. A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of Dendrochronology* (pp. 97-162). Springer-Science+Business Media, B.V.
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (1990). *Methods of dendrochronology*. Springer-Science+Business Media, B.V.
- de Bauer, L. I., Hernández Tejeda, T. y Manning, W. J. (1985). Ozone Causes Needle Injury and Tree Decline in *Pinus hartwegii* at High Altitudes in the Mountains Around Mexico City. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 35(8), 838-840.
- De Vries, W., Klap, J. M., & Erisman, J. W. (2000a). Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part I: Hypotheses and approach to the study. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1), 317-333.
- De Vries, W., Reinds, G. J., Klap, J. M., van Leeuwen, E. P., & Erisman, J. W. (2000b). Effects of Environmental Stress on Forest Crown Condition in Europe. Part III: Estimation of Critical Deposition and Concentration Levels and Their Exceedances. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1), 363-386.
- Dictionary MAIN PAGE Text & Grap.* (2007). <http://www.treedictionary.com/DICT2003/V/vigor.html>
- Dizengremel, P. (2001). Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees. *Plant Physiol. Biochem.*, 39, 729-742.
- Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: A review. *European Journal of Forest Research*, 124, 319-333.
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: De la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 77-93.
- Dorantes, C. E., Suárez, A., Torres, A., & Velasco, S. (1981). *Contribución al conocimiento de la densidad, distribución y hábitos alimenticios del venado cola blanca (Odocoileus virginianus) en el «Desierto de los Leones»* [Investigación Modular]. UAM.
- Drobyshev, I., Linderson, H., & Sonesson, K. (2007). Relationship Between Crown Condition and Tree Diameter Growth in Southern Swedish Oaks. *Environ Monit Assess*, 128, 61-73.
- Duchesne, L., Ouimet, R., & Morneau, C. (2003). Assessment of sugar maple health based on basal area growth pattern. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 2074-2080.

- Dwyer, J. P., Cutter, B. E., & Wetteroff, J. J. (1995). A dendrochronological study of black and scarlet oak decline in the Missouri Ozarks. *Forest Ecology and Management*, 75, 69-75.
- Edwards, N. T. (1991). Root and soil respiration responses to ozone in *Pinus taeda* L. seedlings. *New Phytol.*, 118, 315-321.
- Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México. Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, 89, 195-2019.
- Espinosa Garduño, J. (2010). Gymnospermae. En G. Calderón de Rzedowski & J. Rzedowski (Eds.), *Flora fanerogámica del Valle de México* (Digital, pp. 45-46). CONABIO e Instituto de Ecología A.C.
- FAO. (2015). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Informe Nacional (México)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/documents/card/es/c/154c5a2b-882d-4d3e-b040-7dd52a778d17/>
- Febles Patrón, J. L. (2004). *Arquitectura, vigor y vitalidad en árboles de makulis (Tabebuia rosea), almendro (Terminalia catappa) y flamboyán (Delonix regia), impactados por huracanes en Mérida, Yucatán* [Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural]. El Colegio de la Frontera Sur.
- Fenn, M. E., de Bauer, L. I., & Hernández-Tejeda, T. (2002). *Urban Air Pollution and Forests*. Springer.
- Fenn, M. E., de Bauer, L. I., Quevedo-Nolasco, A., & Rodríguez-Frausto, C. (1999). Nitrogen and sulfur deposition and forest nutrient status in the Valley of Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 113, 155-174.
- Ferguson, C. W. (1970). Concepts and techniques of dendrochronology. En R. Berger (Ed.), *Scientific Methods in Medieval Archaeology*. Universidad de Arizona.
- Flamand, R. J. L., & Huerta, C. J. (1964). *Contribución al conocimiento de Abies religiosa (H.B.K.) Schl. Et Cham., Pinus montezumae Lamb. Y Pinus hartwegii Lindl.* Inédito, México.
- Florescano, E. (1980). *Una historia olvidada: La sequía en México*. nexos. <https://www.nexos.com.mx/?p=13353>
- Florescano Mayet, E., Sancho y Cervera, J., & Perez Gavilan Arias, D. (1980). Las sequías en México: Historia, características y efectos. *Comercio Exterior*, 30(7), 747-757.
- Flores-Nieves, P., López-López, M., Ángeles-Pérez, G., de la Isla-Serrano, M. y Calva-Vásquez, G. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) Schldtl. et Cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(8), 9-20.
- Freyermunth, J. (1952). *Contribución al conocimiento de la flora fanerogámica del Desierto de los Leones* [Tesis de Licenciatura]. Facultad de Ciencias, UNAM.
- Fritts, H. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press.

- Fritts, H., & Swetnam, T. (1986). *Dendroecology, a tool for evaluating variations in past and present forest environments*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.
- García Acosta, V. (1997). Las «sequías» y sus impactos en las sociedades del México Decimonónico, 1856-1900. En *Historia y desastres en América Latina, vol. II* (pp. 2-32). LA RED.
- García, J. F., Fuentes, M. O., & Matías R., G. L. (2002). *Sequías*. CENAPRED, Secretaría de Gobernación, México; Serie Fascículos.
- Garza, G., & Aragón, F. (1995). La contaminación atmosférica de la Ciudad de México en escala megalopolitana. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 10(1), 35-65.
- Gehrig, M. (2004). *Methoden zur Vitalitätsbeurteilung von Bäumen Vergleichende Untersuchungen mit visuellen, nadelanalytischen und bioelektrischen Verfahren*. Diss. ETH Zürich.
- Gómez Díaz, J. D., Monterroso Rivas, A. I., Tinoco Rueda, J. A., Toledo Medrano, M. L., Conde Álvarez, C., & Gay García, C. (2011). Assessing current and potential patterns of 16 forest species driven by climate change scenarios in Mexico. *Atmósfera*, 24(1), 31-52.
- Grissino-Mayer, H. D. (2003). A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-Ring Research*, 59(2), 63-79.
- Gutiérrez García, G. (2004). *Análisis dendrocronológico y económico de Abies vejari, Pinus hartwegii, Pinus strobiformis, y Pinus teocote en la Sierra de Peña Nevada, Nuevo León* [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Harold, W., & Hocker, Jr. (1984). Capítulo 3. Forma y crecimiento de los árboles forestales. En *Introducción a la biología forestal* (pp. 59-89). AGT Editor, S.A.
- Harper, J. L. (1977). *Population biology of plants*. Academic Press.
- Hernández Cerda, M. E., Carrasco Anaya, G., & Alfaro Sánchez, G. (2007). Cronología de las sequías en el mundo y en México. En *Mitos y realidades de la sequía en México* (pp. 17-26). Instituto de Geografía UNAM.
- Hernández-Tejeda, T., & de Bauer, M. L. I. (1984). Evaluación del daño por gases oxidantes en *Pinus hartwegii* and *P. montezumae* var *lindleyi* en El Ajusco, México, D.F. *Agrociencia*, 56, 183-194.
- Herrejón Gómez, M. de los A. (2018). *Registro de remoción de contaminantes atmosféricos a partir de las especies arbóreas en los bosques urbanos de Chapultepec, San Juan de Aragón y Tlalpan* [Tesis de Licenciatura]. UNAM.
- Huerta Crespo, J. (1978). *Anatomía de la madera de 12 especies de coníferas mexicanas* (3a ed., Vol. 51). SARH.
- INECC. (2007). *Parque Nacional Desierto de los Leones* [Gubernamental]. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/108/df.html#top>
- Innes, J. L. (1993). *Forest Health: Its Assessment and Status*. CAB International.



- Jaimes Palomera, M., & Rivera Hernández, O. (2018). *Calidad del aire en la Ciudad de México. Informe 2017* (p. 119) [Medio Ambiente]. Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México.
- Jiménez López, S. (2019). *Disminución del crecimiento de anillos y traqueidas de Abies religiosa (Kunth) Schlttdl. & Cham. Atribuible al SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y NO<sub>x</sub> en el Parque Nacional Desierto de los Leones* [Licenciatura]. UNAM.
- Jurkonis, N., Juknys, R., & Vencloviénė, J. (2006). Relationship between Scots Pine Individual Tree Mortality and Tree Vigor Indicators in the Polluted Environment. *Baltic Forestry*, 12(2), 184-191.
- Keller, T. (1983). Air pollutant deposition and effects on plants. En B. Ulrich & J. Pankrath (Eds.), *Effects of Accumulation of Air Pollutants in Forest Ecosystems* (pp. 285-294). Reidel Publishing Co.
- Keen, F. (1943). Ponderosa Pine Tree Classes Redefined. *Journal of Forestry*, 41, 249-253.
- Klap, J. M., Oude Voshaar, J. H., De Vries, W., & Erisman, J. W. (2000). Effects of Environmental Stress on Forest Crown Condition in Europe. Part IV: Statistical Analysis of Relationships. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1), 387-420.
- Kuuluvainen, T. (1988). Crown architecture and stemwood production in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *Tree Physiology*, 4, 337-346.
- Lachance, D., & DesRoches, P. (1994). *Canada's national forest health monitoring plot network: Manual on plot establishment and monitoring*. Canadian Forest Services.
- Larsson, L.-A. (2004). *Dendrochronology, curve matching and mathematics*. Cybis Dendrochronology and History. <http://cybis.se/forfun/dendro/newmath2/index.htm>
- Legorreta, J. (1991). La grave contaminación atmosférica de la Ciudad de México. *Ciencias*, 22, 55-61.
- Lilly, S. J. (2001). *Arborists' certification study guide*. International Society of Arboriculture.
- López-López, M. Á. (1997). Efectos del ambiente aéreo y del suelo sobre el desarrollo de síntomas de declinación del oyamel. *TERRA*, 15(3), 287-293.
- Lorenc-Plucinska, G. (1988). Effect of nitrogen dioxide on CO<sub>2</sub> exchange in Scots pine seedlings. *Photosynthetica*, 22, 108-111.
- Mandujano, S., & Hernández, G. (1990). Análisis de los factores ambientales que influyen sobre el nivel poblacional del venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), en el Parque «Desierto de los Leones», D.F. En J. L. Jaramillo & F. Rivera (Eds.), *Áreas Naturales Protegidas en México y Especies en Extinción* (pp. 351-364). UNAM.
- Manzanilla, H. (1974). Investigaciones Epidemológicas y Silvícolas en Bosques Mexicanos de *Abies religiosa*. Dirección General de Información y Relaciones Públicas de la SAG.
- Manzano-Méndez, F., Valdez-Hernández, J. I., López-López, M. Á., & Vaquera-Huerta, H. (2010). Crecimiento en diámetro de *Zanthoxylum kellerianii* P. Wilson en una selva perennifolia del norte de Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 16(2), 19-33.

- Martínez Cruz, A. L. (2005). El valor consuntivo del Desierto de los Leones. *Gaceta Ecológica*.
- Martínez, T., Plascencia, F. O., & Islas, L. (2013). La relación entre los carbohidratos y la vitalidad en árboles urbanos. *Revista Chapingo*, 19(3), 459-468.
- Matisons, R., Gerra, L., & Laivins, M. (2016). Pointer years in tree-ring width of European Ash with different crown condition and their relationships with climatic factors in Latvia. *Proceedings of the Latvian Academy of Sciences*, 70(3), 116-123. <https://doi.org/10.1515/prolas-2016-0019>
- Matyssek, R., Reich, P., Oren, R., & Winner, W. E. (1995). Response mechanisms of conifers to air pollutants. En W. K. Smith & T. M. Hinckley (Eds.), *Ecophysiology of Coniferous Forests* (pp. 255-308). Academic Press.
- McLaughlin, S. B., McConathy, R. K., Duvick, D., & Mann, L. K. (1982). Effects of chronic air pollution stress on photosynthesis, carbon, allocation and growth of white pine trees. *For. Sci.*, 28, 60-70.
- Melo Gallegos, C. (1979). *Ensayo metodológico para la planificación del Parque Nacional Desierto de los Leones, D.F.* [Tesis de Maestría]. UNAM.
- Merriam-Webster's Collegiate Dictionary. (1994). *Vitalidad* (10a ed.). Merriam-Webster, Incorporated.
- Naturalista, CONABIO. (s. f.). *Oyamel neovolcánico (Abies religiosa)*. Naturalista. Recuperado 19 de septiembre de 2020, de <https://www.naturalista.mx/taxa/136897-Abies-religiosa>.
- Olson, R. K., Binkley, D., & Böhm, M. (Eds.). (1992). *The response of western forests to air pollution. Ecological studies no. 97*. Springer-Verlag.
- Pallardy, S. G., & Kozlowski, T. T. (2008a). Chapter 5 Photosynthesis. En *Physiology of woody plants* (3a ed., pp. 156-158). Elsevier.
- Pallardy, S. G., & Kozlowski, T. T. (2008b). Chapter 6 Enzymes, Energetics and Respiration. En *Physiology of woody plants* (3a ed., pp. 193-194). Elsevier.
- Pallardy, S., & Kozlowski, T. (1981). Water relations of Populus cones. *Ecology*, 62, 159-169.
- Pérez Suárez, M., Cetina Alcalá, V., Aldrete, A., Fenn, M. y Landois Palencia, L. (2006). Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México. *Agrociencia*, 40(2), 239-248.
- Pérez Suárez, M., Fenn, M., Cetina Alcalá, V. y Aldrete, A. (2008). The effects of canopy cover on throughfall and soil chemistry in two forest sites in the México City air basin. *Atmósfera*, 21(1), 83-100.
- Pineda-Herrera, E., Valdez-Hernández, J. I., Pérez-Olvera, C. de la P., & Dávalos-Sotelo, R. (2015). Fenología, crecimiento en diámetro y periodicidad de Hura polyandra en Costa Grande, Guerrero, México. *Botanical Sciences*, 93(4), 741-753.
- Poorter, H., Van der Werf, A., Atkin, O. K. y Lambers, H. (1991). Respiratory energy requirements of roots vary with the potential growth rate of plant species. *Physiol. Plant.* 83, 469-475.

- Random House Webster's College Dictionary. (1992). Vitalidad. En *Random House Webster's College Dictionary*. Random House.
- Razo Ángel, G. (2005). *Registro de los metales pesados con PIXE en anillos de crecimiento de árboles de los parques Nacionales Desierto de los Leones y El Chico, Hgo.* UNAM.
- Rebbeck, J., & Loats, K. V. (1997). Ozone effects on seedling sugar maple (*Acer saccharum*) and yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera*)—Gas exchange. *Can. J. For. Res.*, *27*, 1595-1605.
- Reich, P. B. (1983). Effects of low concentrations of ozone on net photosynthesis, dark respiration, and chlorophyll contents in aging hybrid poplar leaves. *Plant Physiology*, *73*, 291-296.
- Reich, P. B. (1987). Quantifying plant response to ozone: A unifying theory. *Tree Physiology*, *3*, 63-91.
- Retzlaff, W. A., Williams, L. E., & DeJong, T. M. (1991). The effect of different atmospheric ozone partial pressures on photosynthesis and growth of nine fruit and nut species. *Tree Physiology*, *8*, 93-105.
- Ribas-Carbó, M., Flórez-Sarasa, I. D., & González-Meler, Á. (2008). 14. La respiración de las plantas. En J. Azcón-Bieto & M. Talón (Eds.), *Fundamentos de fisiología vegetal* (2a ed., pp. 265-285). McGraw-Hill.
- Rincón, E., & Huante, P. (1989). Dendrocronología. *Ciencia*, *40*, 245-256.
- Rivera Hidalgo, C., Sánchez Rojas, F., & Andrade Robles, M. A. (2016). *Contaminación Atmosférica de la Zona Metropolitana del Valle de México y sus efectos en la salud aplicación móvil «Aire Escuelas» como propuesta para mejorar el sistema de información y comunicación en escuelas primarias de la Ciudad de México* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Rivera, R., López, M., & Campos, R. (2006). Nutrición y síntomas de declinación de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. Et Cham. En el Desierto de los Leones, D.F. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, *12*(2), 145-150.
- Riveros, H. G. (2008). Física y contaminación atmosférica. *Revista Electrónica Nova Scientia*, *1*(1), 1-17.
- Rzedowski, J. (1978). *La vegetación de México*. Limusa.
- Salas, G., & Sánchez, R. V. (2016). *Diagnóstico de la condición de la salud forestal en el Parque Nacional Desierto de los Leones* [Tesis de Licenciatura, UNAM].
- Sánchez Villanueva, K. E. (2018). *Adecuación de la técnica SPAD-502 Plus para la evaluación de la clorofila como indicador de daño por ozono troposférico en Abies religiosa (Kunt) Schltdl. E Cham. Del Parque Nacional Desierto de los Leones* [Licenciatura]. UNAM.
- SARH. (1984). *Patrones de porcentajes de retención de copa*. SARH.
- Schomaker, M. E., Zarnoch, S. J., Bechtold, W. A., Latelle, D. J., Burkman, W. G., & Cox, S. M. (2007). 2 Field Procedures and Methods. En *Crown-Condition Classification: A Guide to Data Collection and Analysis* (pp. 5-34). United States Department of Agriculture.

- SEMARNAT. (2015). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap2.html>
- SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente. Ecosistemas Terrestres*.  
<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap2.html>
- SEMARNAT, Secretaría de Salud, Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, & Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. (2011). *PROAIRE 2011-2020*.
- Shigo, A. (1990). *Die neue Baumbiologie*. Bernhard Thalacker Verlag.
- Siebe, C., Reinhold, J., & Stahr, K. (1996). 2. Ubicación y factores ambientales del sitio. En *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo* (pp. 5-12). Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.
- SMA-CDMX. (2018). *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2017* (p. 120). Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
- Smith, W. H. (1981). *Air Pollution and Forests. Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems* (Primera). Springer.
- Sosa, A. (1952). *Parque Nacional Desierto de los Leones*. Dirección General Forestal y de Caza. Secretaría de Agricultura y Ganadería.
- Soto Colobaltes, N. V. (2017). El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): Tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales. *Dynamis*, 37(1), 187-209.
- Srivastava, H. S., Jolliffe, R. A., & Runeckles, V. C. (1975). The effects of environmental conditions on the inhibition of leaf gas exchange by NO<sub>2</sub>. *Can. J. Bot.*, 53, 475-482.
- Stokes, M., & Smiley, T. (1996). *An introduction to tree-ring dating*. The University of Arizona Press.
- Tallent-Halsell, N. G. (1994). *Forest health monitoring 1994: Field methods guide*. EPA/620/R-94/027. US Environmental Protection Agency.
- UAM, & PAOT. (2010). *Metodología para la actualización y delimitación fisiográfica de las poligonales de las Áreas Naturales Protegidas Desierto de los Leones, Cumbres del Ajusco y El Tepeyac*. PAOT.
- Universidad de Helsinki. (15 de junio de 2021). *Forests*. <http://www.hiilipuu.fi/articles/plant-respiration>
- van Leeuwen, E. P., Hendriks, K. C. M. A., Klap, J. M., de Vries, W., de Jong, E., & Erisman, J. W. (2000). Effects of environmental stress on forest crown condition in Europe. Part II: Estimation of stress induced by meteorology and air pollutants. *Water, Air, and Soil Pollution*, 119(1), 335-362.
- Vargas Márquez, F. (1997). Desierto de los Leones. En *Parques Nacionales de México. Volumen I: Zonas Centro, Occidente y Oriente* (Primera, pp. 19-44). Instituto Nacional de Ecología.

- Villanueva Díaz, J., Cerano Paredes, J., Constante García, V., Montes González, L. E., & Vázquez Selem, L. (2009). *Muestreo Dendrocronológico: Colecta, preparación y procesamiento de núcleos de crecimiento y secciones transversales*. Inifap.
- Vogt, D., Eschtruth, A., & Upmeyer, M. (s. f.). *Methods of Ecosystem Analysis-Yale Forestry School*. Yale Forestry School.
- Wareing, P. F. (1964). La fisiología del árbol en relación con la genética y sus aplicaciones. *Revista de Silvicultura y Productos Forestales*, 18(2-3).
- Watmough, S. A., & Hutchinson, T. C. (1999). Change in the dendrochemistry of sacred fir close to Mexico City over the past 100 years. *Environmental Pollution*, 104(1), 79-88.
- Watson, D. J. (1956). Leaf growth in relation to crop yield. En *The growth of leaves* (pp. 178-194). Butterworth.
- Watson, D. J. (1958). Factors limiting production. En *The biological productivity of Britain* (pp. 25-32). Institute of Biology.
- Yunus, M., & Iqbal, M. (Eds.). (1996). Plant Response to Air Pollution. En *Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution forests*. United Nations Economic Commission for Europe; Bundesforschungsanstalt fuer Forst- und Holzwirtschaft.
- Zarnoch, S. J., Ruehle, J. L., Belanger, R. P., Marx, D. H., & Bryan, W. C. (1994). *Growth and Crown Vigor of 25-Year-Old Shortleaf Pine Progenies on a Littleleaf Disease Site* (SE-289; p. 12). United States Department of Agriculture. [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp\\_se289.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp_se289.pdf).

## 14. ANEXO 1: Indicadores de la condición de los árboles

A. “Indicadores de la condición de los árboles considerados en los programas de monitoreo de salud forestal en Norte América y Europa (Burley et al., 2004).

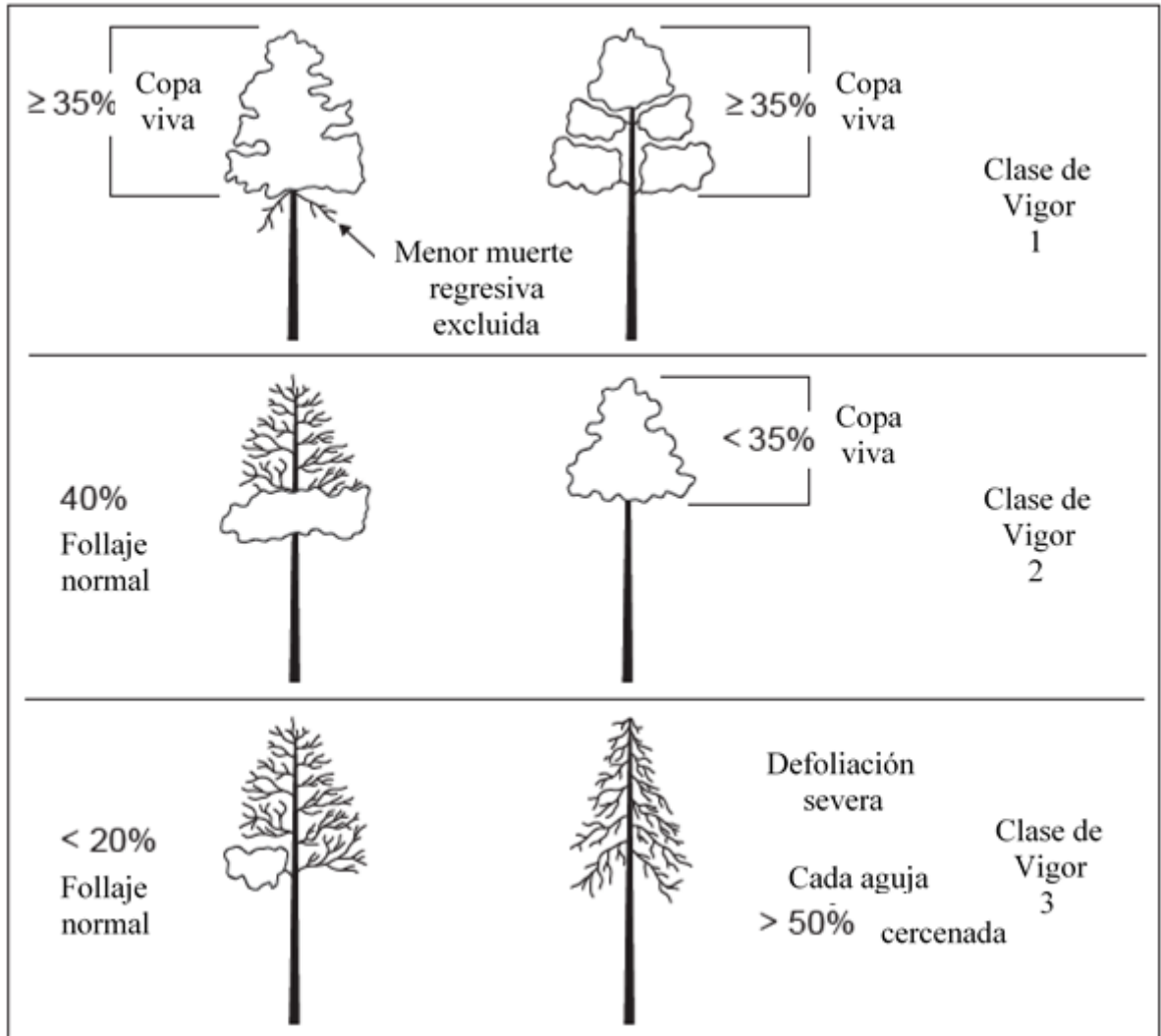
ARNEWS Canada	US FHM	Europa: UN/ECE ICP Forests	
		Nivel I	Nivel II
Síntomas abióticos de follaje—nivel	Mortalidad catastrófica	Defoliación de la copa	Defoliación de la copa
Síntomas abióticos de follaje—tipo	Densidad de la copa	Decoloración de la copa	Tipo de defoliación de la copa
Altura superior desnuda	Diámetro de la copa	Categoría de daño	Decoloración de la copa—edad del follaje afectado
Cierre de copa	Muerte regresiva de la copa		Decoloración de la copa—color
Condición del dosel	Categoría de daño (tipo)		Decoloración de la copa—ubicación
Falta de follaje actual	Ubicación del daño		Decoloración de la copa—clase
Diámetro a la altura del pecho	Severidad del daño		Decoloración de la copa—tipo
Dominancia	Daño/causa de muerte		Morfología de la copa
Daño en follaje—enfermedad	Diámetro a la altura del pecho		Sombreado de la copa
Daño en follaje—insectos	Transparencia de copa		Daño a hojas/aguja—extensión
Altura a la parte superior de la copa viva	Altura		Daño a hojas/aguja—tipo
Altura a la base de la copa viva	Radio de copa viva		Daño a ramas—ubicación
Retención de hojas	Clase social		Daño a ramas—tipo
Semilla	Edad del árbol		Daño a tronco—ubicación
Forma del tallo	Edad del árbol a la altura del pecho		Daño a tronco—tipo
Daño de la tormenta	Historia del árbol		Deformación del follaje—extensión
Altura total			Deformación del follaje—tipo
Daño del tejido leñoso—enfermedad			Epífitas
Daño del tejido leñoso—insectos			Floración
Daño del tejido leñoso otro			Tamaño de la copa
			Transparencia de copa
			Fructificación
			Altura
			Remoción y mortalidad
			Clase social

**B.** “Posibles indicadores no visuales de la condición del árbol” (Burley et al., 2004).

<b>Morfología e histología</b>	<b>Bioquímica</b>	<b>Fisiología</b>
Estructura celular	Sustancias bioquímicas	Fotosíntesis
Propiedades de la superficie de las hojas	Mioinositol	Respiración
Anillos de crecimiento	Sistemas de desintoxicación	Transporte y asignación de fotosintatos
	Actividad de la peroxidasa	Nivel de asimilados
	Superóxido dismutasa	Transporte de asimilados
	$\alpha$ -Tocoferol	Transpiración
	Ácido ascórbico	
	Glutatión	
	Ácidos amino y enzimáticos	
	Arginina, histadina, triptófano, y putrescina	
	Ácido glutámico, ácido aspártico, glutamina, y asparagina	
	Nucleótidos adenina y piridina	
	pH de sustancias foliares	
	Composición de ácidos grasos	
	Composición de protoplastos	
	Conductancia eléctrica	
	Concentración de los pigmentos foliares	
	Nutrición mineral	
	Química de los anillos de crecimiento	
	Química de la cera de agujas	

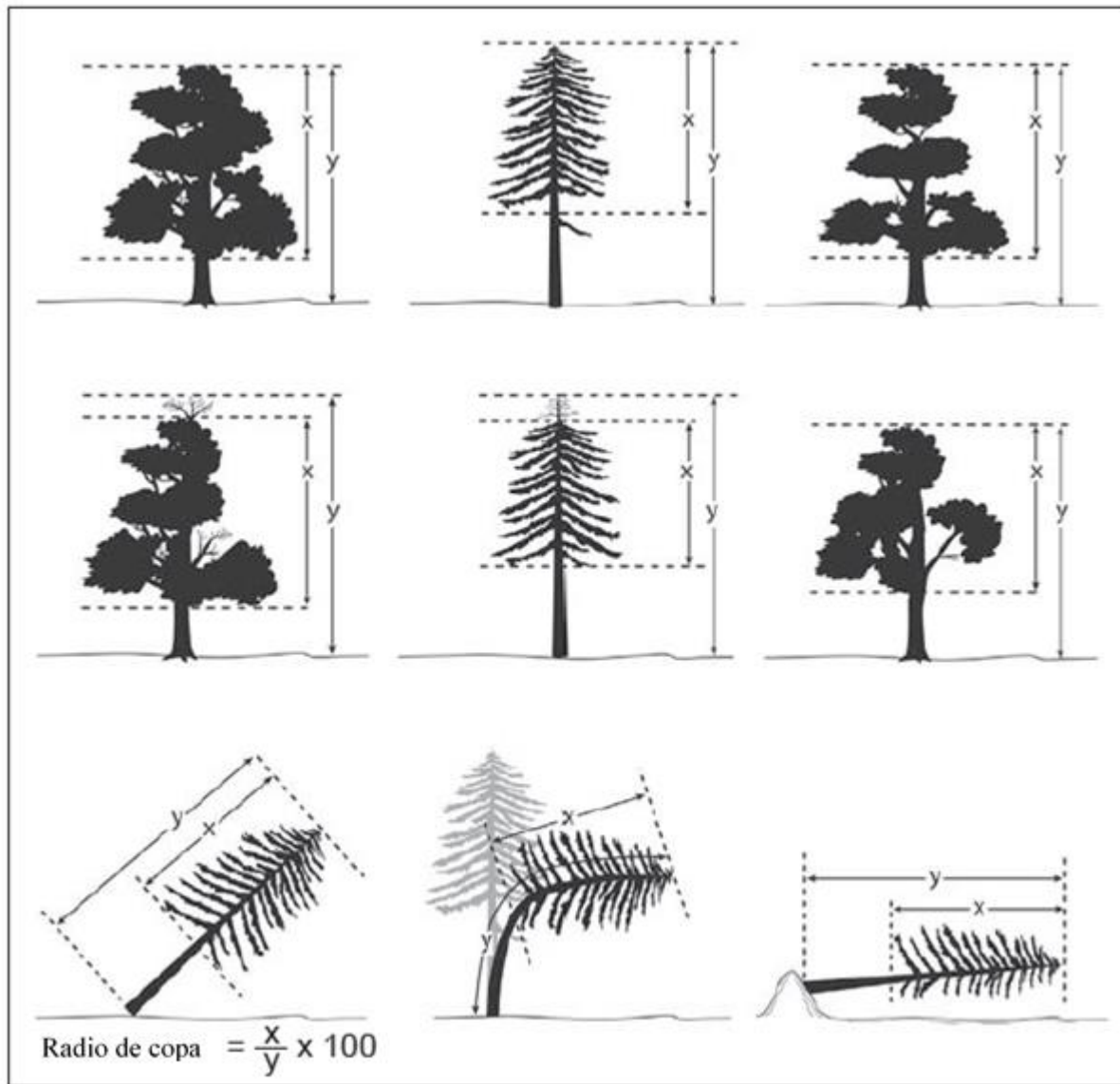
## 15. ANEXO 2: Indicadores de la arquitectura de copa

### A. Clase de vigor

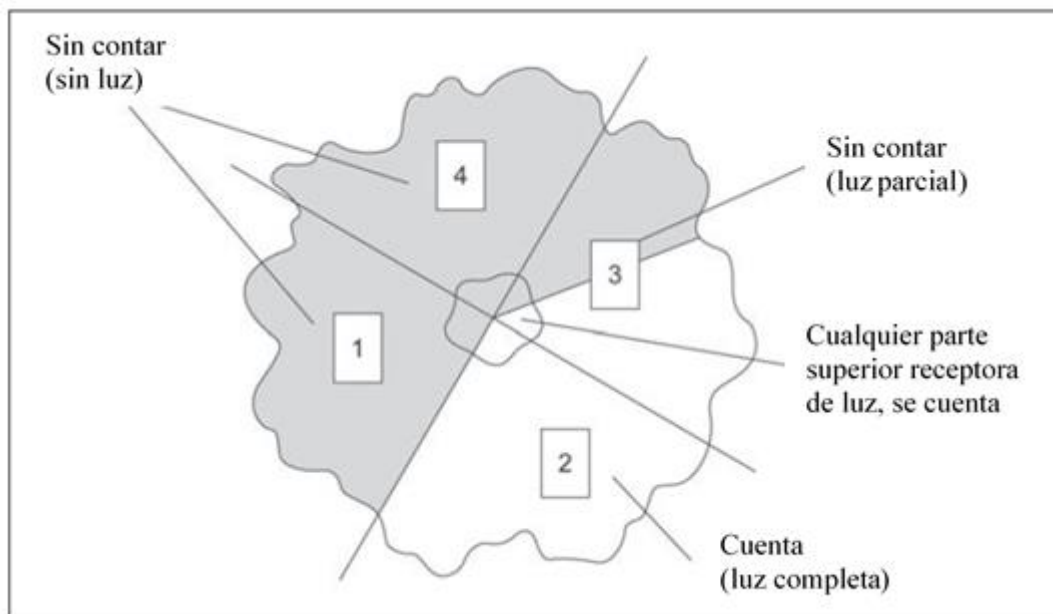




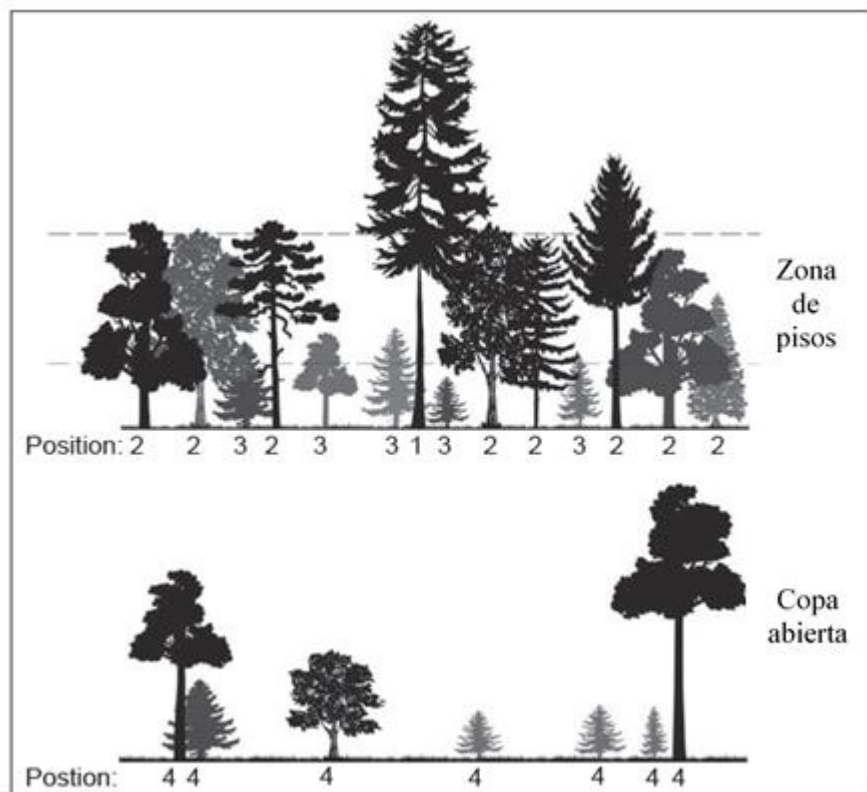
**B. Radio de la copa viva no compactada**



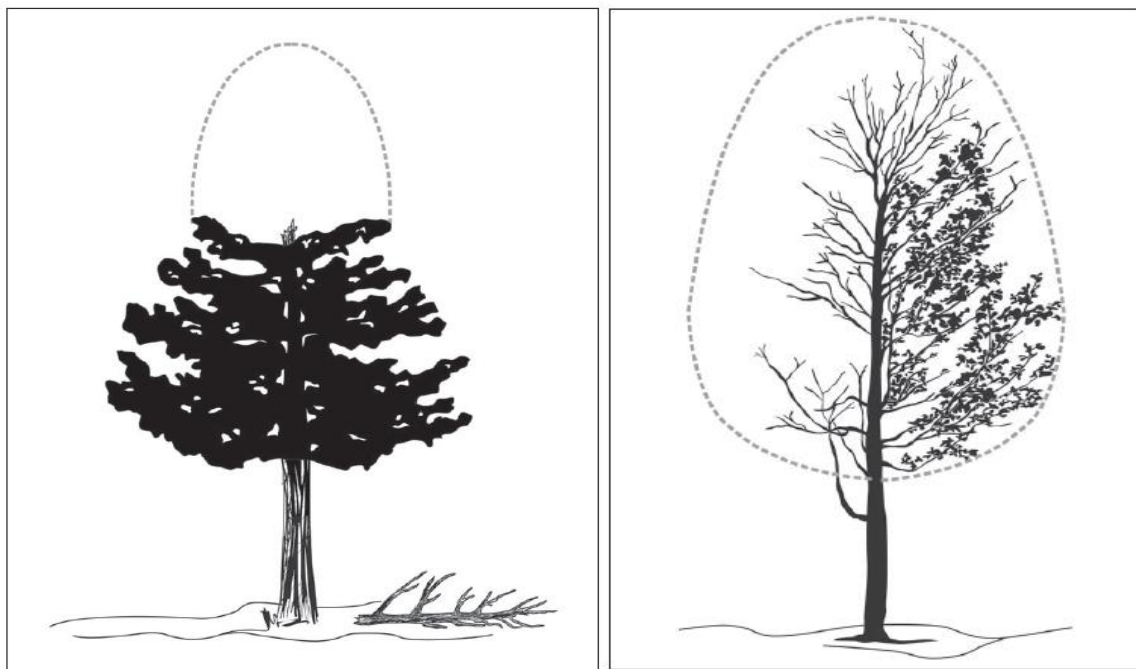
**C. Exposición a la luz de la copa**



**D. Posición de la copa**



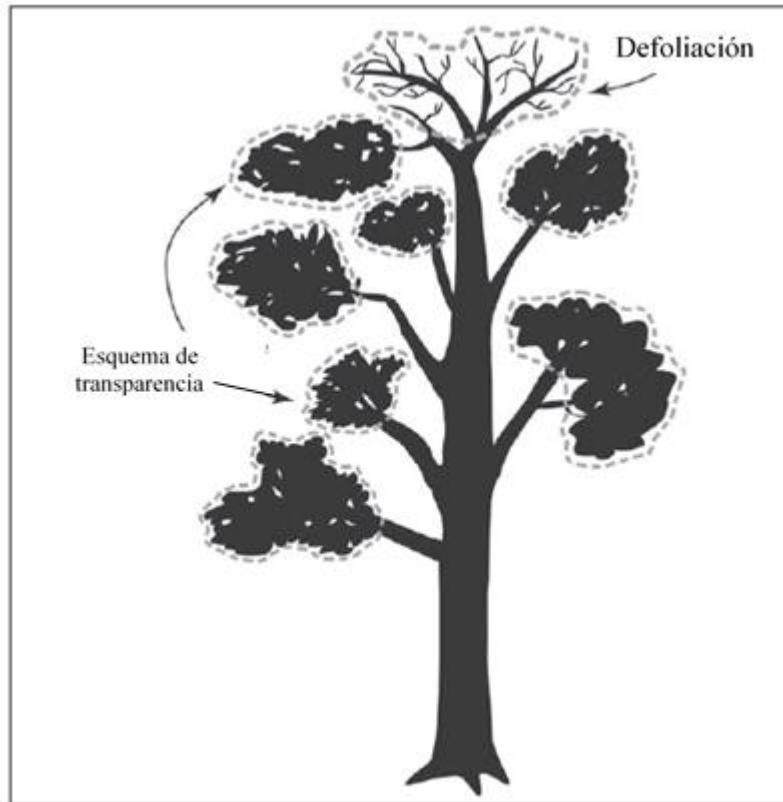
**E. Densidad de la copa**



**F. Muerte regresiva de la copa**
















**G. Transparencia del follaje**



**H. Diámetro de la copa**



16. ANEXO 3: Patrones de porcentaje de retención de copa  
SARH (1984).

% DE COPA RETENIDA	0	25% 1/4	50% 2/4	75% 3/4	100% 4/4
TIPO DE MORTALIDAD					
<b>Irregular (I)</b>	 MP	 I1	 I2	 I3	 S
<b>Descendente (D)</b>					
	 D1	 D2	 D3		
<b>Ascendente (A)</b>					
	 A1	 A2	 A3		
<b>Lateral (L)</b>					
	 L1	 L2			

S= Saludable  
MP= Muerto en Pie

Laboratorio de Contaminación Atmosférica  
FES-Zaragoza-UNAM

## 17. ANEXO 4: Régimen climático

A. Precipitaciones acumuladas y medias anuales (mm), de las estaciones La Venta Cuajimalpa y Desierto de los Leones, los datos fueron tomados de CONAGUA (s.f.b, s.f.a).

AÑO	ACUMULADO	MEDIA	AÑO	ACUMULADO	MEDIA
1949	794.8	66.2	1968	1,352.30	112.7
1950	899	74.9	1969	1,570.10	130.8
1951	931.5	84.7	1970	1,192.40	99.4
1952	1,436.70	119.7	1971	1,566.60	130.6
1953	1,317.70	109.8	1972	1,293.70	107.8
1954	1,315.10	109.6	1973	1,516.50	126.4
1955	1,110.40	100.9	1974	1,024.40	85.4
1956	927.3	84.3	1975	1,243.30	103.6
1957	989.2	82.4	1976	1,484.70	123.7
1958	1,781.00	148.4	1977	1,118.50	93.2
1959	1,479.00	123.3	1978	1,134.90	94.6
1960	989.5	82.5	1979	1,145.40	95.5
1961	1,212.90	101.1	1980	1,224.60	102.1
1962	802.1	72.9	1981	1,662.20	138.5
1963	1,350.40	112.5	1982	1,162.70	96.9
1964	1,241.50	103.5	1983	1,182.00	107.5
1965	1,351.80	112.7	1984	1,699.50	141.6
1966	1,174.50	97.9	1985	1,386.10	126
1967	1,535.40	128	1986	1,309.40	109.1

B. Precipitaciones acumuladas y medias anuales (mm), de las estaciones Desierto de los Leones y Desviación Alta al Pedregal, datos tomados de CONAGUA (s.f.a, s.f.c).

AÑO	ACUMULADO	MEDIA	AÑO	ACUMULADO	MEDIA	AÑO	ACUMULADO	MEDIA
1987	1,103.20	122.6	1997	1,101.50	91.8	2007	995.5	90.5
1988	890.8	74.2	1998	1,180.90	107.4	2008	989.5	90
1989	459.8	46	1999	929.8	77.5	2010	1,090.70	136.3
1990	1,213.10	101.1	2000	1,094.50	91.2	2013	552.5	46
1991	1,073.50	97.6	2001	1,253.00	104.4	2014	332.4	27.7
1992	1,037.00	94.3	2002	868	72.3	2015	300.1	25
1993	598.5	66.5	2003	1,163.50	97	2016	184	15.3
1994	1,235.90	112.4	2004	1,198.00	119.8			
1995	136	13.6	2005	815.5	81.6			
1996	1,036.50	94.2	2006	1,292.50	107.7			