

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

División de Ciencias Forestales

✓ Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración natural de *Pinus hartwegii*



DIRECCION ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

Tesis que presenta:

Rebeca Eugenia González Medina

Como requisito parcial
para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias
en Ciencias Forestales**

**Chapingo, Estado de México
1998**

871681



**Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración
natural de *Pinus hartwegii***

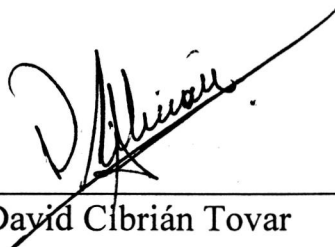
Por:

Rebeca Eugenia González-Medina

Esta tesis se realizó bajo la dirección del Dr. David Cibrián Tovar, misma que ha sido aprobada por el siguiente Comité Asesor y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales

Director:



Dr. David Cibrián Tovar

Asesor:



Dr. Armando Equihua Martínez

Asesor:



Dr. Hugo Ramírez Maldonado

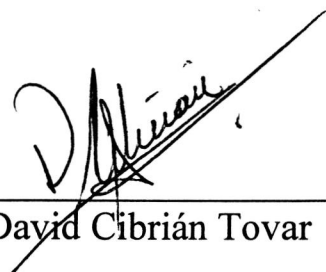
33093

Chapingo, Estado de México, México. Mayo de 1998.

Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración natural de *Pinus hartwegii*

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de **Rebeca Eugenia González-Medina**, autor de la presente tesis de Maestría en Ciencias, estuvo constuido por:

Presidente:


Dr. David Cibrián Tovar

Asesor:


Dr. Armando Equihua Martínez

Asesor:


Dr. Hugo Ramírez Maldonado

Chapingo, Estado de México, México. Mayo de 1998.

Esto sabemos: la tierra no pertenece al hombre;
El hombre pertenece a la tierra.
Todo va enlazado como la sangre que une a una familia.

El hombre no tejió la trama de la vida,
él es sólo un hilo.
Lo que hace con la trama se lo hace así mismo.

Carta del Jefe Seattle al Gran Jefe Blanco de Washington
1858
(fragmento)

DEDICATORIA

*A ti Señor antes que a nadie,
fuente divina de mi inspiración y mi voluntad,
Gracias*

*A mi familia,
cuyos dones he cosechado desde la infancia
y que ahora estoy sembrando
(somos un gran equipo)
Los amo a todos*

*A los amigos que se han ido:
Noé, con la certeza de que volveremos a encontrarnos,
te llevo siempre en el corazón.
Eternamente*

*Para los cuates,
Con quienes he compartido buenos y extraordinarios momentos,
lágrimas y sinsabores,
y con quienes seguiré compartiendo mi corazón,
porque la vida es un continuo...*

Con amor

Rebeca Eugenia

Marzo 1998

AGRADECIMIENTOS

Un reconocimiento al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** y a la **Universidad Autónoma Chapingo**, el cual hago extensivo a los profesores y al personal administrativo de la **División de Ciencias Forestales**, por el financiamiento y las atenciones que me proporcionaron durante mi formación en la Maestría en Ciencias Forestales.

A mi asesor, el **Dr. David Cibrián Tovar** quiero expresarle mi admiración y respeto por su acertada dirección y su paciencia, y por haber puesto una luz diferente en mi camino profesional.

Un especial reconocimiento al **M.C. Carlos Cántora** por sus observaciones y su apoyo para resolver las diferentes etapas del análisis estadístico, sin su participación no hubiera alcanzado mi objetivo inicial.

La identificación de los insectos descortezadores fue realizada por el **Dr. Armando Equihua** del **Instituto de Fitosanidad del Colegio de Postgraduados**, quien enriqueció este proyecto con sus sugerencias y decidida participación.

Al **Dr. Hugo Ramírez** le agradezco sus observaciones y la revisión tan detallada que hizo al documento.

A la **Dra. Amparo Borja de la Rosa**, quiero agradecerle sus palabras de aliento, así como las atenciones que nos brindó a mí y a todos mis compañeros durante nuestra estancia en el programa de postgrado. Cabe mencionar que el trabajo de campo se realizó con el financiamiento de la **Coordinación de Postgrado de la División y de la Subdirección de Investigación de la UACH**.

Desde el inicio de la tesis fui apoyada por el **Laboratorio de Entomología Forestal de la División de Ciencias Forestales**, que proporcionó la infraestructura necesaria para el desarrollo de este proyecto; por lo que, a todo el personal del laboratorio les doy las gracias por haberme recibido y agradezco sus observaciones y la oportunidad que me ofrecieron de compartir un tiempo y un espacio.

El trabajo de campo pudo efectuarse gracias a la participación de muchas personas que colaboraron desinteresadamente, a todos ellos muchas gracias. En Zoquiapan participó la brigada de campo de la **Estación Forestal de la UACH** a cargo del **Ing. Ambrosio Bojorgez** y posteriormente, del **Ing. Isidro Lazcano**, dicha brigada está integrada por los señores: **Roberto Lazcano, Fortino González, Martiniano Moreno, Diego Reséndiz y José Valdez**; un reconocimiento a la **familia Rocha Reyes**, responsable del mantenimiento de las instalaciones, que hizo grata mi estancia y la de mis asistentes técnicos en numerosas ocasiones.

En Ajusco participó la **Subdelegación de Recursos Naturales del Distrito Federal** dependiente de la **SEMARNAP**; al encargado de la misma, **Ing. Leonel Morales** y a su personal técnico, señores: **Joel Zavala, José Luis Verduzco, Juan González, José Hernández, Abraham Hernández** y en especial a **Juan Camacho** y a **Rolando Jiménez**, les doy las gracias por su apoyo durante el trabajo de campo.

Por parte de la **División de Ciencias Forestales de la UACH** conté con la colaboración técnica del **Sr. Wenceslao Sánchez** y la asistencia de la **Subdirección Administrativa** a cargo del **Lic. Fernando Flores Mata**, así como con el apoyo de los señores **Francisco Zarco y Cirilo Carrillo**; a todos mi sincero agradecimiento por sus atenciones.

Deseo mencionar al **M.C. Marcelo Zepeda**, quien dedicó parte de su tiempo para aclarar mis dudas respecto a los análisis. Las tablas de colores fueron diseñadas con la asesoría de la **Mtra. Leticia Arango**. El material grafico digitalizado fue realizado por el **Lic. Rosalío Mejía**, quién en numerosas ocasiones enriqueció este trabajo con sus comentarios. Todos los programas escritos en **FORTTRAN IV**, fueron modificados por el **Fis. Alejandro Vázquez** para hacerlos más accesibles al usuario.

A mis asistentes técnicos: **Adolfo Iván Vázquez G., Laura Melisa Vázquez G. y Ulises Omar Huerta G.**, les hago un reconocimiento especial por su activa participación y su paciencia durante el trabajo de campo. Finalmente, a los profesores: **Rodolfo Campos, Tulio Méndez, Adolfo Palma y Antonio Pérez**, así como al **M.C. Juan Quintanar del Campo Experimental San Martinito**, a la **Dra. Lourdes de la I.**

de Bauer y al Dr. Dionicio Alvarado les agradezco sus sugerencias y las facilidades que me dieron para el desarrollo de la tesis.

A mi **querido esposo**, que en numerosas ocasiones patrocinó mis salidas de campo así como parte de los costos derivados de mi estancia en la Maestría, quiero externarle mi agradecimiento por su comprensión.

A mi **querida familia** (de tres generaciones), por ser un constante estímulo de superación, tanto académica como personal; deseo agradecer su paciencia y el tiempo que me dieron libre para poder concluir este sueño, que además que ser una meta académica es un proyecto de vida.

A todas las personas que, directa o indirectamente, colaboraron en este trabajo y a todos aquellos que confiaron en mí para hacer de este proyecto una realidad, espero no haberlos defraudado.

RESÚMEN

Rebeca Eugenia González Medina

**Evaluación de la salud forestal en dos áreas de regeneración
natural de *Pinus hartwegii*
(1998)**

(Bajo la dirección del Dr. David Cibrián Tovar).

La salud forestal de árboles jóvenes de *Pinus hartwegii* fue comparada en dos Parques Nacionales, Ajusco y Zoquiapan, ambos localizados cerca de la ciudad de México, aunque el Ajusco recibe mayor flujo de contaminantes provenientes de la ciudad. Las variables relacionadas con el vigor de ambas localidades fueron monitoreadas para identificar las más explicativas. Las variables seleccionadas fueron: color de la copa, retención de follaje, condición de la punta, daño del follaje, forma del tronco e infección de muérdago enano. En ambas localidades los árboles tenían el mismo diámetro, pero en Zoquiapan fueron más jóvenes y altos que en Ajusco, las medias respectivas fueron: Zoquiapan; edad 7.9 años; altura 3.75 m, Ajusco; edad 10.3 años; altura 2.25 m. La salud forestal de Zoquiapan fue considerada mejor que en Ajusco, porque los árboles mostraron mejor color, acículas más largas, mejor condición de la punta, menor daño foliar y mejor conformación del tronco.

PALABRAS CLAVE: vigor, salud forestal, *Pinus hartwegii*

SUMMARY

Rebeca Eugenia González Medina

Evaluation of forest health in two regeneration areas of *Pinus hartwegii* (1998)

(Under direction of Dr. David Cibrián Tovar).

The forest health of young *Pinus hartwegii* trees was compared in two National Parks, Ajusco and Zoquiapan; both of them located near Mexico City, but Ajusco received the polluted air flow after it go through the big city. The variables related with vigor of both localities were screened to detect those more explicative of he forest health condition: crown color, needle retention, top condition, needle damage, shape of the trunk and dwarf mistletoe infection were selected. In both localities, the trees had the same diameter, but the Zoquiapan trees were younger and taller than those from Ajusco, the respectively means were: Zoquiapan, age 7.9 years, high 3.75 m; Ajusco, age 10.3 years, high 2.25 m. The forest health of Zoquiapan was better considered than Ajusco, because the trees had better color, long size of needles, better top condition, less needle damage and better shape of the trunk.

KEY WORDS: vigor, forest health, *Pinus hartwegii*

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO.....	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
3.1. Indicadores ambientales y de salud forestal.....	5
3.2. Declinación forestal y susceptibilidad.....	12
3.2.1. Agentes causales de origen antropogénico.....	14
3.2.2. Agentes causales de origen natural.....	17
3.3. Los síntomas de declinación forestal.....	21
3.4. Riesgo y susceptibilidad.....	23
3.5. Eventos históricos de declinación forestal.....	26
3.5.1. Norteamérica y Europa Central y del Este.....	26
3.5.2. La declinación forestal en México.....	29
3.6. Monitoreo ambiental y salud forestal.....	31
3.6.1. ¿Cómo es la salud forestal del ecosistema?.....	32
3.6.2. Desarrollo de modelos predictivos e indicativos de la salud forestal...	33
3.6.3. Política ambiental y normatividad.....	34
3.6.4. La evaluación de la salud forestal en México.....	36
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38
4.1. Descripción de las áreas de estudio.....	38
4.2. Selección de sitios.....	40
4.3. Levantamiento de la información.....	41
4.4. Parámetros de vigor.....	42
4.5. Parámetros dasométricos y follaje.....	44
4.6. Edad.....	45
4.7. Evaluación del vigor.....	45
4.7.1. Parámetros de la copa.....	45
4.7.1.1. Color.....	45

4.7.1.2. Retención del follaje.....	47
4.7.1.3. Condición de la punta.....	48
4.7.2. Variables del fuste.....	49
4.8..Evaluación de la biodiversidad de insectos descortezadores	
(Coleoptera: Scolytidae).....	50
4.9. Categorización de variables.....	51
4.10. Análisis estadísticos.....	55
5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN.....	57
5.1. El programa: SCREEN.....	57
5.1.1. Las tarjetas de control.....	58
5.1.2. Selección de variables.....	59
5.1.3. Variables seleccionadas.....	60
5.1.3.1. Ajusco.....	60
5.1.3.2. Zoquiapan.....	63
5.1.3.3. Análisis conjunto.....	68
5.2. Análisis de frecuencias... ..	73
5.2.1. Variables no paramétricas.....	73
5.2.1.1. Color.....	74
5.2.1.2. Retención de follaje.....	75
5.2.1.3. Condición de la punta.....	76
5.2.1.4. Daño en el follaje.....	77
5.2.2. Variables Paramétricas.....	79
5.2.2.1. Altura.....	80
5.2.2.2. Diámetro.....	81
5.2.2.3. Altura y diámetro.....	82
5.2.2.4. Longitud del follaje.....	83
5.3. Comparaciones no paramétricas.....	86
5.3.1. La Prueba de Kruskal-Wallis.....	86
5.3.1.1. Comparación entre rodales de la misma localidad.....	88
5.3.1.2. Comparaciones múltiples.....	90

5.3.1.3. Comparación entre localidades.....	93
5.4. Comparaciones paramétricas.....	95
5.4.1. La prueba de Tukey.....	95
5.4.2. Análisis dasométricos.....	97
5.4.3. Comparación entre rodales de la misma localidad.....	97
5.4.4. Comparación entre localidades.....	103
5.5. Análisis de la edad.....	105
5.6. Análisis de biodiversidad.....	112
5.6.1. El índice de Shannon-Weiner.....	112
5.6.2. Estudios comparativos de la diversidad biológica entre comunidades....	116
5.6.3. La técnica de la rarefacción.....	117
5.6.4. Series logarítmicas de abundancia de especies.....	117
5.6.5. La biodiversidad en cada área de estudio.....	120
5.6.5.1. La diversidad de insectos descortezadores en el Ajusco.....	120
5.6.5.2. La diversidad de insectos descortezadores en Zoquiapan.....	126
5.6.6. Estimación de índice de diversidad en cada sitio.....	133
6. DISCUSIÓN.....	138
7. CONCLUSIONES.....	139
8. RECOMENDACIONES.....	142
9. LITERATURA CITADA.....	144
10. APÉNDICE.....	153

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	Página
1. Indicadores ambientales utilizados en la evaluación de la calidad del ecosistema (modificado de IFTM 1994).....	7
2. Indicadores de salud forestal utilizados en la evaluación de la calidad ambiental.....	10
3. Clasificación de las variables utilizadas en el campo para el levantamiento de la información de acuerdo al tipo de análisis por aplicar.....	41
4. Criterios de calificación de las variables de vigor que se utilizaron para evaluar el estado de vigor de árboles jóvenes (de 1 a 8m de altura). Localidades de Zoquiapan, Edo. de Méx. y Ajusco, D.F.....	43
5. Escala de evaluación del daño foliar de acuerdo al porcentaje de manchados cloróticos presentes en el follaje de los árboles de la muestra.....	44
6. Escala de calificación de vigor de acuerdo a la transparencia de la copa.....	47
7. Tipos de punta más frecuentemente observados en ambas localidades y su calificación correspondiente para caracterizar el estado de vigor.....	48
8. Categorización de variables cualitativas utilizadas para evaluar el vigor en árboles jóvenes de 1 a 8 m de altura de <i>Pinus hartwegii</i>	52
9. Reparametrización de variables continuas (altura, diámetro normal y longitud del follaje) a un sistema de clases discretas de 8 clases.....	54
10. Variables seleccionadas por el programa SCREEN en la localidad del Ajusco.....	60
11. Resultados de la selección de variables con el programa SCREEN en Zoquiapan.....	64
12. Resultados de la selección de variables con el programa SCREEN en Zoquiapan.....	69

13. Resultados del análisis de frecuencias para las variables seleccionadas por SCREEN en la localidad de Zoquiapan.....	73
14. Resultados del análisis de frecuencias para las variables seleccionadas por SCREEN en la localidad de Ajusco.....	73
15. Frecuencia en porcentaje de las variables seleccionadas por SCREEN en Zoquiapan.....	78
16. Frecuencia en porcentaje de las variables seleccionadas en Ajusco.....	78
17. Resultados del análisis de frecuencia de las variables paramétricas. Zoquiapan, Edo. de México.....	79
18. Resultados del análisis de frecuencia de las variables paramétricas. Ajusco, D.F.....	80
19. Resultado del análisis de frecuencias de las variables paramétricas expresado en porcentaje. Zoquiapan, Edo. de Méx.....	85
20. Resultado del análisis de frecuencias de las variables paramétricas expresado en porcentaje. Ajusco, D.F.....	85
21. Resultado del análisis no paramétrico aplicado a las variables seleccionadas por SCREEN. Zoquiapan, Edo. de Méx.....	89
22. Resultado del análisis no paramétrico aplicado a las variables seleccionadas por SCREEN. Ajusco, D.F.....	90
23. Número de individuos y ubicación altitudinal de los rodales en cada área de estudio.....	90
24. Ejemplo del procedimiento de comparación múltiple entre rodales para una sola variable.....	92
25. Rodales estadísticamente iguales (a un nivel del 95% de confianza) para las variables de vigor analizadas en cada localidad.....	92
26. Comparación entre el vigor de las localidades (a un nivel del 95% de confianza) para las variables seleccionadas por SCREEN.....	94
27. Resultado del análisis de medias para las variables: altura, diámetro normal y longitud del follaje, en ambas localidades.....	97

28. Resultado del análisis de varianza para las variables de interés: altura, diámetro normal y longitud de follaje.....	99
29. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para la altura. Zoquiapan, Edo. de Méx.....	99
30. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el diámetro. Zoquiapan, Edo. de Méx.....	100
31. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el largo de la hoja. Zoquiapan, Edo. de Méx.....	100
32. Resultado del análisis de varianza para las variables de interés: altura, diámetro normal y longitud de follaje.....	101
33. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para la altura Ajusco, D.F.....	101
34. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el diámetro. Ajusco, D.F.....	102
35. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el largo de la hoja. Ajusco, D.F.....	102
36. Resultado del análisis de varianza entre localidades.....	104
37. Resultados de la edad y el promedio de la altura para una submuestra de 80 árboles.....	105
38. Estimación de los parámetros de la ecuación de crecimiento de cada sitio.....	106
39. Lista de especies identificadas en el Ajusco.....	121
40. Riqueza de especies estimada con el programa RAREFAC.....	122
41. Curva de especies estimada por el programa LOGSERIE.....	124
42. Lista de especies identificadas en Zoquiapan.....	126
43. Riqueza de especies estimada con el programa RAREFAC.....	128
44. Curva de especies estimada por el programa LOGSERIE.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama general de un plan de monitoreo de salud forestal.....	37
2. Esquema general de las diferentes etapas del análisis de los datos	56
3. Árbol de decisiones de la primer corrida de SCREEN con las variables de la localidad de Ajusco.....	61
4. Ramas superiores del árbol de decisión de Zoquiapan.....	65
5. Ramas inferiores del árbol de decisión de Zoquiapan	66
6. Árbol de decisión del análisis conjunto (ramas superiores).....	70
7. Árbol de decisión del análisis conjunto (ramas inferiores).....	71
8. Frecuencia de observaciones del color del follaje en cada área de estudio. El nombre descriptivo de cada categoría de color (cero a seis) aparece en recuadros.....	74
9. Retención de acículas por localidad.....	75
10. Estado de la punta en las dos localidades.....	76
11. Estado de la punta en las dos localidades	77
12. Clases de altura en cada localidad (medida en metros).....	80
13. Diámetro normal de los árboles de la muestra (medido en cm).....	81
14. Diámetro normal de los árboles de la muestra (medido en cm)	82
15. Diámetro y altura del arbolado en Zoquiapan.....	83
16. Longitud promedio de las acículas (medidas en cm).....	84
17. Modelo de crecimiento en altura para la localidad de Zoquiapan	111
18. Modelo de crecimiento en altura para la localidad del Ajusco.....	111
19. Curva de abundancia relativa de especies de insectos descortezadores en el Ajusco. Hospedero <i>Pinus hartwegii</i>	122
20. Curva de rarefacción para la comunidad de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> , localidad Ajusco, D.F	123

21. Curva de abundancia de especies en escala logarítmica para 14 especies de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> en el Ajusco	125
22. Curva teórica de Whittaker para la abundancia relativa de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> en la localidad del Ajusco, D.F	125
23. Curva de abundancia relativa de especies de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> , localidad Zoquiapan, edo. de Méx.....	127
24. Curva de rarefacción para la comunidad de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> , localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.....	129
25. Curva de rarefacción para la comunidad de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> , localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.....	130
26. Curva teórica de puntos de Whittaker para la abundancia predicha de insectos descortezadores de <i>Pinus hartwegii</i> , localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.....	130

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad se está presentando un proceso de deterioro ambiental producido por diversos factores, algunos de ellos de origen antropogénico; este deterioro se ve acelerado por los cambios climáticos que promueven el calentamiento global de la atmósfera. Como consecuencia, se ha reducido la cobertura vegetal de muchas regiones del mundo, perdiéndose una gran riqueza y diversidad biológica, lo cual afecta la estructura de muchos ecosistemas y modifica sus procesos. El proceso de deterioro ambiental pone en riesgo la existencia de numerosas especies, entre ellas la nuestra, lo que ha suscitado el desarrollo de un nuevo enfoque sobre el manejo y la conservación de los recursos naturales, en especial por su valor escénico y su productividad.

Este nuevo enfoque ha permitido la generación de numerosos términos científicos; en varios casos ha sido necesario adecuarlos a las diferentes regiones y desarrollo tecnológico de cada país, o bien desarrollar herramientas metodológicas accesibles de fácil aplicación y bajo costo, con el propósito de encontrar nuevas alternativas para el estudio y la conservación de los ecosistemas. En la actualidad, se realizan diversas investigaciones de evaluación ambiental que utilizan toda una serie de criterios científicos muy recientes, a la vez que aplican nuevas metodologías para la identificación del impacto que tienen las actividades humanas en el ecosistema.

El estudio de los recursos naturales exige un monitoreo continuo de las condiciones que prevalecen en el ambiente; para ello existen diferentes alternativas basadas en criterios de calidad ambiental, los cuales reflejan la susceptibilidad del recurso ante diferentes factores estresantes que pueden ser de origen natural o antropogénico; esta serie de criterios de diagnóstico de la calidad ambiental, en conjunto, son indicadores de la salud del ecosistema.

Respecto a los recursos forestales, desde la segunda mitad de este siglo y como consecuencia de una serie de eventos de mortalidad forestal extensiva que se registraron en diferentes partes del mundo, se han desarrollado nuevas metodologías para la evaluación fitosanitaria. México no es la excepción, en nuestro país también se tienen

casos de mortalidad que han afectado áreas boscosas muy importantes lo que hace indispensable el inicio de los estudios ambientales para la evaluación y recuperación del bosque así como de otros recursos naturales.

La importancia de los estudios de evaluación forestal radica en su capacidad para detectar áreas que merecen atención prioritaria en los bosques naturales o cultivados y establecer **criterios de calidad ambiental** que sean útiles en la **toma de decisiones y en la administración de los recursos naturales**, de tal forma que generan un marco de referencia científico y técnico para el establecimiento de programas de manejo adecuados, los que a su vez permiten la recuperación y el uso de los recursos naturales.

Al realizar una evaluación forestal se pueden utilizar indicadores de vigor del arbolado, los cuales permiten calificar el estado de salud de la vegetación. En este trabajo se desarrolló un sistema para la evaluación de la salud forestal en dos áreas boscosas próximas a la ciudad de México utilizando indicadores ambientales basados en las características fisonómicas de la vegetación.

Los sitios de trabajo se establecieron en el Parque Nacional Zoquiapan y en el Parque Nacional Ajusco, localizados al este y sur de la ciudad de México, respectivamente. Debido a la exposición de cada área de estudio con respecto al patrón de circulación de los vientos (en dirección norte-sur), se esperaba encontrar diferencias en el estado de vigor de la vegetación de los dos bosques; ya que ambos están sometidos a diferente grado de perturbación por efecto de la presión humana y por la depositación de contaminantes sobre los árboles. Estos contaminantes son arrastrados por el viento que los desplaza principalmente hacia el sur; además los bosques que se ubican en esta zona se encuentran sometidos a mayor presión por la afluencia de visitantes, la reducción de acuíferos y el contrabando de madera, todos ellos son factores de disturbio menos intensos en las regiones boscosas más alejadas de los centros urbanos.

Al principio del presente trabajo se plantearon las siguientes preguntas:

- ¿Cuáles son las variables indicadoras de vigor más importantes?**
- ¿Cómo es el vigor del arbolado en cada localidad?**
- ¿Cuál es la asociación entre las variables indicadoras de vigor?**
- ¿Existen diferencias en la diversidad de insectos descortezadores de pino de ambas localidades?**

Y de ellas se derivaron los siguientes:

2. OBJETIVOS

- ❖ Generar criterios para la calificación del vigor
- ❖ Evaluar y comparar la salud forestal en dos áreas de regeneración natural de *Pinus hartwegii* próximas a la ciudad de México
- ❖ Utilizar un marco de comparación estadístico entre las dos áreas de estudio

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Desde hace varias décadas los ecosistemas han experimentado un proceso de deterioro continuo, producido por las presiones humanas a las que se ven sometidos. Estas presiones ocasionan empobrecimiento del ambiente al alterar o interrumpir los mecanismos naturales de los ecosistemas; inducen cambios, por ejemplo la disminución de especies, la alteración de cadenas tróficas, la reducción de acuíferos, los cambios en el paisaje por la depositación de contaminantes en el suelo, en los cuerpos de agua o en la atmósfera; a estas alteraciones se suma la presión por el espacio y los subsecuentes cambios en el uso de suelo debidos al desarrollo de centros urbanos y a la producción de bienes y servicios para la población.

Las alteraciones en el medio natural tienen un alto costo, la pérdida de biodiversidad ocasiona un medio más homogéneo que en las plantas propicia una menor resistencia al ataque de patógenos o a los cambios climáticos bruscos; lo anterior se traduce en cuantiosas pérdidas económicas en los cultivos y plantaciones, además de una considerable disminución en el banco de germoplasma que podría ser utilizado en la investigación farmacéutica para el desarrollo de nuevos medicamentos o alimentos de alto valor nutritivo. Por otro lado, al reducir la biodiversidad faunística se pierde la posibilidad de buscar alternativas económicamente rentables para el desarrollo de criaderos de fauna nativa que satisfagan las necesidades alimenticias de la población.

La pérdida de especies, la disminución de la heterogeneidad ambiental, la reducción de acuíferos, los efectos nocivos de los contaminantes en la salud y en el ambiente, así como en los organismos que en él habitan; son parte del precio a pagar por las alteraciones producidas en los ecosistemas. Lo anterior pone en riesgo la permanencia de las especies y afecta la productividad de los ecosistemas a corto y largo plazo; por esta razón el deterioro ambiental ha despertado el interés para la realización de estudios en esta área que permitan conservar productivo el medio natural para la obtención de satisfactores para la población presente y futura.

3.1. Indicadores ambientales y de salud forestal

Desde hace dos siglos en los bosques del mundo se han presentado diferentes eventos de mortalidad forestal, éstos son parte de un proceso de declinación que ha afectado a grandes áreas boscosas produciendo fuertes pérdidas económicas. Este proceso, que se puede presentar como un mecanismo en la regeneración natural de los ecosistemas, en la actualidad afecta a numerosas zonas boscosas en especial a las cercanas a las ciudades.

Los eventos de declinación forestal tienen un alto costo económico y ecológico; las modificaciones producidas en el paisaje por la pérdida de la cubierta forestal favorecen la erosión de los suelos, reducen la recarga de acuíferos y en general disminuyen la capacidad productiva del bosque. Un ecosistema en buen estado manifiesta una productividad más elevada y a mayor plazo, además no afecta negativamente a la comunidad.

De acuerdo a la definición de Wilson (1991) un bosque sano es un ecosistema productivo, resistente y diverso, un bosque con futuro; en este contexto la productividad de las áreas naturales está en función de su calidad ambiental; es decir si la calidad del ambiente es adecuada, la productividad se incrementa (USDA(1) 1993, Lewis *et al.* 1994, EPA 1994, USDA 1994; Alexander *et al.* 1993; Hellkamp *et al.* 1995); en este caso es factible hacer uso de los recursos por largo tiempo, sin agotarlos, permitiendo que se regeneren de manera natural o bien por el efecto de un manejo adecuado. En un bosque sano existe un balance entre el crecimiento y la mortalidad, así como una mayor capacidad de la vegetación de resistir exitosamente a los impactos ambientales.

La calidad del ambiente se puede estimar mediante la utilización de elementos de diagnóstico bióticos o abióticos, estos se basan en las características intrínsecas del ecosistema y pueden ser de carácter social, al incluir el potencial de recreación de la zona o su valor estético, también pueden estar relacionados con la integridad ecológica del ambiente, lo cual implica la biodiversidad, la productividad y la sustentabilidad del mismo (Lewis *et al.* 1994; CFS(3) 1996; Peck S. 1994; Chesnut L.G. y R.D. Rowe 1989); En los bosques naturales, la integridad del ecosistema incluye los procesos de

crecimiento, reproducción y mortalidad de la masa forestal que se asocian con su capacidad productiva y con mecanismos de tipo ecológico, como la sucesión de especies dentro de la comunidad.

Los indicadores ambientales se pueden definir como "características medibles que solas o en combinación con otras, proveen evidencia científicamente útil y manejable de la calidad del ambiente y del ecosistema o aportan evidencia confiable de las tendencias de la calidad ambiental " (ITFM 1994). De esta forma, los indicadores permiten detectar oportunamente problemas ambientales y muestran que tan factible es la aplicación de un plan de manejo específico por periodos de tiempo establecidos.

La importancia de los indicadores es que se pueden asociar a características físicas del ambiente, además de que describen la sustentabilidad del recurso, permitiendo identificar los posibles agentes causales que ocasionan la reducción o la pérdida de la calidad ambiental; por lo que se han propuesto diferentes indicadores de acuerdo al tipo de ecosistema en cuestión, con el propósito de reconocer la relación causa-efecto y establecer planes de monitoreo para el diagnóstico oportuno de problemas ambientales. Como característica común, los indicadores deben ser económicos, aplicables, repetibles, confiables y sensibles a los cambios ambientales, de tal forma que su validez científica permita que puedan ser utilizados en estudios comparativos realizados bajo otras condiciones de tiempo y espacio.

En el siguiente cuadro se resumen algunos de los tipos de indicadores ambientales más frecuentes.

CUADRO 1. Indicadores ambientales utilizados en la evaluación de la calidad del ecosistema (modificado de IFTM 1994).

INDICADORES AMBIENTALES			
TIPOS DE INDICADORES	DE INTERÉS HUMANO	INTEGRIDAD ECOLÓGICA	ECONÓMICOS
De respuesta biológica	• microorganismos en el agua • parásitos en los alimentos • invasión de especies nocivas • consumo de alimentos contaminados • pérdida de especies de valor nutritivo o turístico	• biodiversidad de especies • modificación de cadenas tróficas • extinción de especies clave • incremento de la mortalidad • alteraciones en el crecimiento • modificación de la estructura de la comunidad	• reducción de la productividad • disminución de especies benéficas • incremento de la biomasa en aguas de uso industrial • sobreabundancia de especies en los sistemas de riego y de navegación • pérdida de especies de valor comercial
De respuesta química	• cambios en olor/sabor del agua • depositación de metales y materia orgánica • cambio en el pH del agua • acumulación de sustancias tóxicas	• incremento de poblaciones nocivas • cambios en la estructura de la comunidad • cambio del pH por acidificación del suelo o aumento de la salinidad • cambio en el pH del suelo que altera la sustentabilidad del ecosistema	• efecto sobre la vegetación y suelos agropecuarios • disminución de la fertilidad • daños en la maquinaria por el uso de agua contaminada
Efecto en el habitat	• sedimentación en cuerpos de agua • cambios en la temperatura • cambio de la geomorfología por actividades humanas o por el depósito de desechos urbanos e industriales • alteraciones en el paisaje • reducción del valor escénico	• disminución de la productividad primaria • aumento de la mortalidad • reducción de la cobertura vegetal • modificación de la vegetación riparia • cambio en la producción del ecosistema y transferencia de materia orgánica • alteraciones climáticas	• reducción de la cosecha • cambios en la navegación por depósitos de sedimentos • depositación de materia orgánica y sedimentos en presas y canales • disminución de la producción

En el caso de los estudios forestales existen criterios de diagnóstico de la calidad ambiental basados en la estructura del suelo, la cobertura vegetal, la presencia de especies de importancia cinegética, la biodiversidad y riqueza de especies; que son indicadores de la salud forestal. Estos indicadores constituyen una fuerte base para la identificación y caracterización de los problemas ambientales y reflejan el grado de perturbación del medio, proporcionando una estimación del efecto de las actividades humanas sobre la vegetación, a la vez que permiten hacer proyecciones futuras del estado en que se encontrarán esos bosques, estimando las tasas de mortalidad, de crecimiento o de regeneración natural entre otras; a su vez facilitan el manejo forestal y proporcionan criterios para el desarrollo de políticas ambientales que permitan la recuperación del ecosistema o su utilización en la extracción de productos.

Al considerar que un bosque sano resiste los eventos catastróficos que se presentan y que a su vez mantiene una capacidad productiva elevada por largos periodos de tiempo, el objetivo primordial es revertir el deterioro del ecosistema forestal para obtener una elevada calidad ambiental que permita un uso más prolongado del recurso. Para ello, se requiere identificar el estado de salud de las áreas forestales para categorizar su nivel de productividad y proyectar, hacia el futuro, un plan de manejo estratégico que incluya los mecanismos de extracción del recurso, así como su valor turístico y social.

Para conseguir una alta calidad ambiental debe existir un marco de referencia conceptual que ubique cual es la condición sanitaria que se desea para un bosque en particular. Si se desea un bosque saludable, que resista a las enfermedades así como a otros factores adversos, es necesario tener una definición clara de este concepto, de tal forma que sea factible comparar entre distintas regiones geográficas la calidad ambiental del bosque y buscar la condición sanitaria idónea; de lo anterior se desprende que la **salud forestal** es “la condición más deseable para tener un ecosistema sustentable donde los factores bióticos y abióticos no amenazan los objetivos de manejo del recurso” (USDA 1996). Por otro lado, Bartuska (1996) define este concepto como “la condición en la cual el bosque tiene la capacidad de renovarse, para resistir a un amplio rango de disturbios y mantener su plasticidad ecológica mientras reúne los elementos para satisfacer las necesidades futuras y presentes de la población, a los niveles deseados de

valores, usos, producción y servicios”; de lo anterior se desprende que un bosque sano es productivo y manifiesta la capacidad de permanecer en el tiempo y el espacio proporcionando los bienes y servicios necesarios para la población, manteniéndose en una condición donde los factores bióticos o abióticos no representan ninguna amenaza para su manejo actual o futuro del mismo. De esta forma, la salud forestal refleja la capacidad del arbolado para tolerar el efecto adverso de los elementos del ambiente sin disminuir su éxito reproductivo ni su vigor, lo que permite la sobrevivencia del bosque como ecosistema.

El diagnóstico de la salud forestal de un bosque o plantación utiliza como criterios de calificación a indicadores de vigor de la masa forestal; estos indicadores se basan en características fisonómicas del arbolado sensibles a las perturbaciones ambientales por lo que reflejan el efecto adverso del medio sobre la vegetación. El uso de estos indicadores no es reciente; desde el siglo XIX existen trabajos documentados sobre este tema donde se describen características de **la copa, el follaje y el fuste** para diagnosticar el vigor del arbolado (Keen F.P. 1936; Cielsa W.M. y G. Hildebrand 1986; Graham S.A. 1929). Para evaluar la salud forestal se utilizan indicadores ambientales como los descritos en el cuadro 2.

CUADRO 2¹ Indicadores de salud forestal utilizados en la evaluación de la calidad ambiental (modificado de ITSM 1994).

INDICADORES DE SALUD FORESTAL			
TIPO DE INDICADOR	DE INTERÉS HUMANO	INTEGRIDAD ECOLÓGICA	ECONÓMICOS
De respuesta biótica	• pérdida de especies de interés cinegético • disminución de la cobertura vegetal • extinción de plantas medicinales • extinción de animales de uso turístico o alimenticio	• plantas indicadoras • condición de las ramas • forma de copa • lesiones en tallo • color del follaje • daño en ramas y hojas • defoliación prematura • área foliar • mortalidad en pie • regeneración y tasa de crecimiento • comunidades de líquenes • biodiversidad horizontal y vertical • estructura de la vegetación • especies de fauna silvestre • daño por contaminantes • patógenos • actividad fotosintética • pérdida de biomasa • patógenos en el sistema radicular	• disminución de la cosecha por acción de patógenos • incremento en el gasto de insumos para el mantener plantaciones o arbolado urbano • disminución en el valor comercial de los productos por los daños causados por patógenos, estrés o por carencias nutricionales • reducción o pérdida de especies útiles para fines productivos (farmacéutica, ranchos, criaderos, invernaderos, germoplasma, etc.)
De respuesta abiótica	• recreación • valor estético	• depositación de contaminantes • alteraciones en el paisaje • fragmentación del suelo • índice de nitrógeno • presencia de carbón orgánico • acidificación del suelo	• reducción del turismo • cambios en la productividad

¹ Los indicadores de vigor utilizados con mayor frecuencia aparecen resaltados en negrillas

En los trabajos realizados desde la segunda mitad del siglo pasado, se ha encontrado que los indicadores de vigor reflejan el estado fitosanitario de la vegetación además de ser sensibles a los cambios ambientales mostrando el efecto de los factores estresantes sobre el arbolado.

Dunning (1928) mostró que **la densidad de la copa, el color del follaje, la forma de la punta, la ausencia de enfermedades o patógenos y la relación entre tamaño y edad** son buenos estimadores del vigor; además encontró que los daños en la copa, el tallo y el área foliar reducen la tasa de crecimiento ocasionando cuantiosas pérdidas en volumen por el incremento de la tasa de mortalidad forestal. Por otra parte Keen (1936) señala que **la pérdida de color, el estado de la punta, la transparencia de la copa, la presencia de ramas laterales secas y la baja retención de follaje** muestran diferentes estados de vigor del arbolado y reflejan una disminución de la salud forestal, siendo buenos indicadores de la capacidad de resistencia de algunas especies ante el ambiente.

Otros estudios realizados por agencias de protección ambiental en Norteamérica y Europa coinciden con los resultados anteriores (Lewis *et al.* 1994; EPA 1994; Alexander *et al.* 1993; ITFM 1994; Cielsa W.M. y G. Hildebrand 1986; Innes J.L. *et al.* 1994; Hellkamp *et al.* 1995; USDA 1990; USDA(1) 1993; USDA 1994; USDA 1996; CFS(4) 1996) en estos trabajos se establecen como indicadores de vigor **la forma y transparencia de la copa, el área foliar, la presencia de daño en el árbol, el color de la copa, la retención de follaje, la tasa de regeneración natural, la composición de especies, la tasa de mortalidad y la muerte de arbolado en pie**. En las investigaciones realizadas por estas instancias se definen líneas de trabajo en las que se proponen como indicadores de la salud forestal y de la calidad ambiental a las variables referidas en el cuadro 2; parte de las propuestas emitidas por las agencias incluyen programas de monitoreo ambiental en áreas prioritarias por su importancia económica, ecológica o recreativa; estos programas deben estar asociados a la evaluación de las características fisonómicas de las especies de la zona en estudio con el propósito de identificar los disturbios ambientales que enfrentan las áreas naturales; la caracterización de estos problemas contribuye a establecer soluciones oportunas para el mantenimiento de bosques saludables donde impere una alta calidad ambiental que permita un uso más

prolongado de los recursos naturales sin agotarlos conservando la sustentabilidad del ecosistema por largos periodos de tiempo.

Los síntomas descritos como indicadores de la pérdida de vigor muestran la susceptibilidad del arbolado de resistir el ataque de los patógenos, considerando que al disminuir el vigor se incrementa la tasa de mortalidad por la acción de diversos agentes causales.

3.2. Declinación forestal y susceptibilidad

Manion (1991) define la declinación forestal como “el deterioro del árbol que culmina con la muerte del mismo por la combinación de factores de estrés biótico y abiótico”; este concepto se utiliza frecuentemente para describir el desarrollo progresivo de una serie de síntomas que inician con la pérdida de vigor en ramas, tronco, brotes y raíces del árbol produciendo al final de este proceso la muerte en pie del árbol afectado. Los síntomas que se presentan en la declinación son característicos; muchos autores los han identificado encontrando que algunos de ellos se repiten en ciertas especies o condiciones ambientales (Tainter F.H.y F.A. Baker 1996, Bruck R.I. 1989, USDA 1981); de esta forma se han tipificado ciertos síntomas o signos de declinación forestal asociándolos a múltiples agentes causales que pueden ser primarios o secundarios.

En un proceso de declinación forestal participan varios agentes causales, éstos pueden incidir simultáneamente o bien facilitar la acción de algún otro factor adverso sobre la vegetación, acelerando el mecanismo o proceso de declinación; en este caso el efecto de los agentes causales en el ecosistema o árbol individual puede ser de tipo aditivo; por lo que la respuesta del bosque o la plantación ante estos factores depende del estado fitosanitario en que se encuentre en ese momento. Las causas de declinación son numerosas por lo que se han agrupado en tres categorías:

- **Factores de predisposición:** se refieren a las condiciones del sitio que inciden en la capacidad del arbolado para responder ante el eventual daño ocasionado por los agentes causales, en este grupo se incluyen condiciones abióticas como el tipo de suelo y la calidad de aire. En este grupo de elementos también se incluyen factores propios de cada árbol que tienen como característica el cambiar lentamente o el no cambio, los ejemplos respectivos son: la edad y la procedencia genética.
- **Factores de incitación:** son una serie de factores biológicos o fisiológicos que promueven la muerte de partes del árbol. En estas condiciones, los árboles de bajo vigor afectados por factores incitantes, tales como el ataque de plagas o una sequía prolongada, son incapaces de responder positivamente presentando una recuperación muy lenta o tardía.
- **Factores de contribución:** son de carácter biológico y generalmente culminan con la muerte del árbol, en este grupo se incluyen las infestaciones de plagas o enfermedades que atacan a los individuos ya fuertemente debilitados ocasionándoles la muerte.

Las hipótesis que se han propuesto para explicar la declinación forestal son muy variadas; algunas de ellas consideran la acción de factores causales de origen antropogénico entre los que se incluye el cambio climático global producido por la emisión de contaminantes a la atmósfera o el cambio de pH por la depositación de sustancias tóxicas en el suelo; mientras que otras consideran la acción de agentes naturales como la sucesión ecológica o la presencia de microorganismos; las hipótesis más aceptadas (de acuerdo a Cielsa W.M y G. Hildebrand 1986; Huettl R.F. 1989; Miller P.R. 1989; USDA 1990; NAPAP 1993; Tainter F.H.y F.A. Baker 1996; Solomon *et al.* 1993), para explicar el síndrome de declinación forestal se enlistan a continuación:

3.2.1. Agentes causales de origen antropogénico

- **Lluvia ácida y acidificación del suelo:** La depositación de lluvia ácida en el suelo ocasiona un cambio del pH por reducción de la alcalinidad impidiendo el intercambio de nutrimentos del sustrato a la planta a la vez que aumenta la concentración de ácidos en el suelo (Mohnen V.A. 1988; Báez P.A. 1989; Páramo *et.al* 1987) las modificaciones del pH alteran la movilidad de los iones ocasionando una mayor fijación de iones fitotóxicos (H^+ Al^{3+}) en la raíz que causan daños radicales y sequía fisiológica. Las lesiones continuas en el sistema radicular producen pérdida de biomasa afectando a las micorrizas; en consecuencia disminuye la cobertura vegetal del suelo promovándose la erosión del mismo.
- **Depositación de SO_2 :** Con respecto al daño causado en los bosques por efecto de SO_2 existe controversia; en algunos bosques de Europa no se ha encontrado que exista correspondencia entre las altas concentraciones de este contaminante y el daño foliar; sin embargo en Norteamérica (NAPAP 1993; Guderian *et al.* 1985; Mackenzie J.J. y M. El-Ashry 1989) se han identificado varias lesiones foliares en los tejidos de mesénquima y senescencia prematura como síntomas producidos por efecto de disulfuros especialmente cuando actúan en combinación con el ozono y los óxidos de nitrógeno.
- **Nitrógeno y NO_x :** El aumento en la concentración de nitrógeno en los tejidos vegetales promueve la susceptibilidad ante las heladas y la clorosis foliar. Los óxidos de nitrógeno son de importancia por que constituyen uno de los principales reactivos precursores en la formación de ozono; los NO_x reaccionan con el disulfato y el bióxido de carbono en presencia de luz ultravioleta para formar ozono (Heck W.W. 1989); el óxido de nitrógeno al reaccionar con el CO_2 , presente en la atmósfera durante las etapas de inversión térmica, reduce la tasa fotosintética y contribuye a disminuir el crecimiento de la copa.

- **Ozono:** es un contaminante secundario que se forma a partir de los hidrocarburos y los NO_x ; la reacción se efectúa en la parte media de la atmósfera con la acción de la luz ultravioleta que oxida el NO a NO_2 , este compuesto reacciona nuevamente con la luz ultravioleta produciendo el PAN (nitrato de peroxiacetil), en esta reacción el oxígeno liberado se une a una molécula de oxígeno proveniente del CO_2 y se forman moléculas de ozono (O_3) de carácter muy lábil.

En los ecosistemas forestales el ozono afecta a las comunidades de líquenes que se establecen sobre los árboles, además modifica la dinámica del bosque por sus efectos en la sucesión ecológica al reducir la sobrevivencia del banco de semillas, alterar el patrón de crecimiento y aumentar la tasa de mortalidad por descortezadores en individuos debilitados por este gas oxidante; en los árboles produce daño en ramas y mortalidad de la copa (ascendente, descendente o lateral) o del árbol por las lesiones que produce en el sistema radicular.

El ozono daña los tejidos celulares de las hojas ocasionando cambios en la permeabilidad de la membrana y daños en el mesénquima produciendo necrosis, pigmentación, reducción del área foliar y senescencia prematura (Hernández T. T y L.I. Bauer 1989) a la vez que disminuye la fotosíntesis. En algunos casos los síntomas se presentan después de varios días de exposición, pero en otros casos la ausencia de daño visible no es un buen indicador del efecto del ozono, que se puede manifestar con retardo en los individuos afectados.

- **Cambios en el uso de suelo y reducción de acuíferos:** El uso de suelo para actividades industriales o urbanas ha incrementado la presión sobre las áreas naturales al reducir el abastecimiento de agua en los bosques, que están constantemente sometidos a estrés hídrico. La compactación del suelo asociada al estrés hídrico que existe en las áreas naturales facilita el proceso de declinación, ya que los árboles debilitados por las lesiones en la raíz, la

poca disponibilidad de agua y la carencia de nutrimentos son propensos a sufrir daños por los fuertes vientos y los cambios de temperatura.

- **Prácticas de manejo:** Ciertas actividades de manejo forestal pueden afectar el desarrollo sano de los bosques naturales o plantaciones; entre ellas se incluye la construcción de caminos, la compactación del suelo por el uso de maquinaria pesada, la cosecha intensiva y la cacería de fauna silvestre, entre otras. En las áreas naturales donde se han practicado actividades de manejo no intensivo acompañadas por una planeación estratégica (programas de restauración, control de plagas, reforestación, actividades cinegéticas, etc.) se ha registrado una mayor recuperación del bosque y una mejor resistencia del mismo ante los contaminantes disminuyendo las probabilidades de sufrir un proceso de declinación forestal.

La alteración de los patrones de regeneración natural y la caza de fauna nativa contribuyen a disminuir la resistencia de los bosques en presencia de factores adversos, ya que estas especies locales actúan como agentes de dispersión de las semillas y participan en los procesos ecológicos del bosque como son la regeneración y la sucesión. En zonas de recuperación forestal donde se han utilizado semillas producidas en laboratorio se ha encontrado una tolerancia menor de los arboles al ambiente; mientras que los bancos de semillas de origen natural presentan una mayor tasa de germinación asociada a una probabilidad más alta de establecerse exitosamente en el bosque (Bruck R.I. 1989). Ambos casos muestran que en áreas naturales el manejo adecuado es necesario para sostener una mejor recuperación del bosque, conservar una mayor diversidad genética y una mayor capacidad de resistencia al efecto negativo de agentes estresantes.

- **Cambio climático global:** Desde hace casi un siglo se ha registrado un incremento de uno o dos grados centígrados en la temperatura de la atmósfera (CFS(1) 1996; Bruck R.I. 1989; Masera C.O. 1991; Woodwell G.M. 1978); este cambio produce alteraciones en las especies y en los ecosistemas

modificando el crecimiento, los patrones de distribución, el funcionamiento de las comunidades y su estructura; a la vez que favorece el establecimiento de plagas y enfermedades que responden rápidamente a las modificaciones del medio con respecto a los árboles que son incapaces genética y reproductivamente de adecuarse a cambios ambientales evolutivamente abruptos. La causa de estas modificaciones climáticas es la emisión y depositación de compuestos químicos en la atmósfera producidos por las actividades humanas ocasionando el efecto invernadero por el incremento en la concentración de CO₂ y otros hidrocarburos.

- **Incendios:** Los incendios naturales promueven los mecanismos de sucesión de los bosques, en algunos casos contribuyen a la regeneración de las especies y al aumento de la diversidad biológica al favorecer la reincorporación de nutrientes al suelo y el establecimiento de algunas especies de sotobosque (USDA 1996, USDA(1) 1993, USDA 1990); cuando se aplica un control adecuado del fuego se puede establecer un manejo del mismo que contribuya a la recuperación del ecosistema, aplicando tratamientos apropiados en intervalos de tiempo establecidos, de forma que se pueda ir dirigiendo el bosque hacia una condición determinada de acuerdo a un programa de recuperación y conservación del recurso.

Por otro lado, en muchos casos se producen incendios sin ninguna planeación ni objetivo, que son inducidos para el pastoreo o bien por descuido humano. En estas circunstancias, el efecto del fuego es negativo para el bosque, ocasionando cambios en la composición y la estructura del ecosistema forestal, las cuales pueden inducir: la pérdida de especies, simplificación de las cadenas tróficas, erosión, daños en la vegetación, supresión de especies, entre otros, afectando en general la diversidad, la integridad y la sustentabilidad del ecosistema.

3.2.2. Agentes causales de origen natural

- **Microorganismos:** Algunos de los síntomas de la declinación pueden atribuirse al efecto de enfermedades causadas por virus o microorganismos que provocan cambios de coloración en las hojas y pudriciones en la raíz. El número de casos de declinación que puede ser atribuible a los virus es pequeño, pues aún no existe suficiente evidencia de que sea un factor determinante en este proceso (Huettl R.F. 1989); además en algunos casos es posible confundir la sintomatología producida por la baja disponibilidad de nutrimentos con la provocada por factores bióticos por lo que se requiere documentar más casos donde el agente causal sea de tipo biológico identificando si es un factor primario o secundario.
- **Factores climáticos y edáficos locales:** El factor de daño más común en áreas naturales es producido por las condiciones del sitio (pendiente, tipo de suelo, drenaje) en interacción con el clima, en cuyo caso ambos agentes pueden actuar como factores incidentes, especialmente en regiones con condiciones de sitio deficientes donde el crecimiento de los árboles es muy reducido y la frecuencia de daños o muerte de árboles por fuertes vientos u otros factores ambientales es alta (Johnson A.H. y T.G. Siccama 1989, Miller P.R. 1989; Heck W.W. 1989); en las áreas de suelos pobres o delgados con escasez de agua, con pendiente pronunciada o acidificación del sustrato se reduce la tasa de crecimiento y se promueve la declinación. Hay zonas donde las temperaturas extremas y la sequía producen daño en el fuste formando cinturones de tejido lesionado a lo largo del mismo, en este caso el daño es inducido por una mayor evapotranspiración con respecto a una menor captación de agua en el sistema radicular debido a la escasez de humedad en el sustrato; bajo estas condiciones la diferencia en la humedad que ingresa al árbol respecto a la que se evapora produce la desecación del follaje y su caída prematura, o bien puede afectar la punta produciendo rompimiento de ramas o

malformaciones, a la vez que induce la muerte de brotes y ramas ocasionando lesiones en la corteza interna. Las lesiones anteriores pueden producir la muerte del árbol en los casos en que este sea incapaz de producir nuevas hojas y brotes en la siguiente estación de crecimiento.

Confirmando la hipótesis anterior Johnson *et al.* (1997) reportan que el estrés hídrico favoreció el desarrollo de canchales resinosos en *Pinus sylvestris* que después de haber sido inoculados con el hongo *Sphaeropsis sapinea* fueron sometidos a periodos prolongados de sequía lo que aumentó su susceptibilidad ante el desarrollo del patógeno.

- **Sucesión ecológica:** La declinación forestal como un mecanismo del ecosistema (Manion P.D. 1991, Miller P.R. 1989, Bruck R.I. 1989, CFS(1) 1996) favorece a genotipos más adecuados; en estos casos se presenta frecuentemente en los límites de tolerancia de la especie donde ocurren variaciones en las condiciones del sitio. Como un proceso natural puede atribuirse a factores de competencia por recursos como son nutrientes, espacio, luz, agua y suelo; o bien como un mecanismo de sucesión forestal que conduce a una población clímax haciendo pasar a las especies por condiciones de sitio inferiores a las de su límite de tolerancia; en este caso la respuesta de las especies es ajustarse a las nuevas condiciones ambientales o bien sufrir un proceso de deterioro continuo que produce la muerte de grandes masas forestales.

Se ha observado que los bosques de coníferas de origen natural son más resistentes al efecto del ozono y otros contaminantes; en este caso la resistencia de los árboles jóvenes es menor que la observada en el arbolado adulto, por exponerse a una mayor competencia por recursos que debilita al individuo e incrementa la tasa de mortalidad. La menor tolerancia de los árboles jóvenes a la acción de los contaminantes y las presiones humanas (vandalismo, acuíferos, etc.) posiblemente se debe a que los contaminantes penetran en mayor concentración en los tejidos, dañándolos severamente en

ciertas etapas críticas de su desarrollo (formación de brotes, tejido leñoso); el efecto de las lesiones puede ser acumulativo y si el árbol llega a la edad adulta presentará daños en diferentes partes de su tronco o copa, o bien será menos resistente a los patógenos o los cambios ambientales; así en un proceso de sucesión forestal, el ozono altera la dinámica de la comunidad y cambia el patrón de reemplazamiento de las especies.

- **Patógenos y enfermedades:** En un ecosistema sometido a estrés (por contaminantes, falta de agua, uso de suelo, etc.) los árboles son más propensos a infestarse por patógenos o enfermedades; en estas condiciones el incremento de la temperatura favorece el desarrollo de los patógenos al acelerar sus ciclos reproductivos
- **Deficiencias nutrimentales:** Algunas sustancias nutritivas pueden estar presentes en el suelo pero no estar disponibles para los árboles; esto ocurre cuando se producen cambios en el pH del sustrato por la depositación de partículas u otros contaminantes. En otros casos las alteraciones del suelo (por aumento de la salinidad o acidificación del mismo) modifican el intercambio catiónico y producen la carencia de ciertos macro o micro nutrimentos y compuestos nitrogenados, como los siguientes:

Magnesio: Es un constituyente de la clorofila que transforma el CO_2 a materia orgánica; en las coníferas es un ion muy móvil desplazándose de las hojas viejas a las nuevas, su carencia produce amarillamiento, necrosis y caída del follaje.

Potasio: es importante para el crecimiento, es muy móvil, promueve el desplazamiento de otros nutrimentos desde la raíz al interior de la planta y hacia las partes aéreas; en ausencia de este nutrimento las hojas se amarillan, también produce necrosis foliar intervenal.

Calcio: es importante para el crecimiento radial y vertical del árbol, contribuye a formar las paredes celulares en la raíz para la movilidad de nutrimentos desde el sustrato. La deficiencia de calcio produce poco

desarrollo en raíces, crecimiento reducido, pérdida de follaje desde abajo hacia arriba de la copa y desde el exterior de las ramas al interior.

Compuestos de nitrógeno: Las sustancias de origen nitrogenado son muy importantes para el desarrollo y crecimiento vegetal, pero un exceso de estos compuestos ocasiona niveles de intoxicación a la planta predisponiéndola al efecto de otros agentes nocivos a la vez que disminuye la resistencia a las heladas.

3.3. Los síntomas de declinación forestal

En los eventos de declinación forestal existe una serie de síntomas o signos comunes (Manion P.D. 1991; Miller P.R. 1989; CFS(4) 1996; Cielsa W.M. y G. Hildebrand 1986). Los signos son todas las estructuras actuales producidas por los patógenos localizados en el ecosistema; mientras que los síntomas se refieren al aspecto general del árbol (tallo, raíces, hojas, brotes, etc.) en respuesta a los agentes causales de la declinación; además de los síntomas de origen biótico existen daños o deficiencias producidas por factores abióticos (falta de minerales, erosión, incendios, etc.) que generan algún tipo de daño en las diferentes partes del árbol. Los síntomas de declinación muestran el estado sanitario general de la masa forestal y permiten hacer proyecciones futuras de las tendencias que muestra el bosque en términos de productividad o sobrevivencia, o bien realizar inferencias sobre los elementos que actuaron en él para generar la condición de vigor actual.

Es posible diferenciar dos grupos de síntomas: **visuales y no visuales**; los primeros se refieren a la condición fisonómica del árbol, de forma que es posible calificar el vigor del mismo, mediante la utilización de los criterios de diagnóstico: **color de la copa, amarillamiento de las hojas, necrosis foliar y transparencia de la copa**, entre otros; este grupo de síntomas es muy común en bosques de coníferas. El segundo grupo incluye síntomas menos evidentes y de más difícil detección, como son **la disminución de la tasa fotosintética, las alteraciones en la fluorescencia clorofílica,**

la reducción de las reservas en la raíz, los cambios en la proporción de electrolitos del follaje o en la concentración de aminoácidos; la caracterización de este grupo de síntomas es más costosa, pero tiene la ventaja de que permite una detección temprana del efecto del ambiente sobre cada árbol individual o sobre la masa forestal (Hernández T.T. 1984; Huetl R.F. 1989; Percival G.C. y G.R. Dixon 1997).

Como se mencionó anteriormente, los factores que participan en un proceso de declinación pueden incidir simultáneamente sobre el ecosistema, en donde presentan un efecto aditivo o bien afectan de manera única a la comunidad. En general se reconoce la participación de **más de un factor en la declinación** de un área forestal; el mecanismo de interacción incluye el efecto de los factores de incitación, predisposición y contribución que en conjunto inciden sobre el bosque, especialmente cuando presenta una deficiente salud forestal; algunos de los primeros signos más frecuentes son: **los hongos en el sistema radicular, en las hojas o en el fuste, la deformación del tronco como respuesta a los patógenos y las pudriciones en el sistema radicular;** por otra parte, los síntomas más característicos son: **la pérdida de follaje y el cambio de color de las hojas, así como la disminución de las sustancias de reserva asociada a un menor crecimiento del arbolado y a una mayor mortalidad;** bajo estas condiciones la estructura horizontal y vertical de la comunidad se modifica e inicia un proceso de sustitución de la vegetación donde se altera la biodiversidad y la riqueza local de especies; de esta forma en un bosque en declinación se producen serias alteraciones en la composición de la comunidad que modifican el ciclo de intercambio de materia orgánica y los restantes procesos ecológicos del área.

3.4. Riesgo y susceptibilidad

En general, el uso de ambos conceptos, riesgo y susceptibilidad, ha sido confuso y con frecuencia mal interpretado. En este trabajo, se reconoce a un sistema que evalúa el riesgo de aparición de plagas como aquel sistema integrado por dos elementos que son: las poblaciones de agentes parasíticos y la susceptibilidad de los hospedantes.

Paine *et al.* (1984) sostiene que el riesgo de aparición de plagas es la probabilidad de ocurrencia de una infestación de una especie de insecto, de acuerdo a la abundancia de su población y a la susceptibilidad del hospedante; una definición más reciente es la propuesta por el servicio forestal estadounidense, en la cual se afirma que el riesgo es una medida de la probabilidad de que ocurra una catástrofe; a esta medida de probabilidad se le asocia una estimación de la severidad de los efectos que podría tener dicha catástrofe en el ecosistema forestal (USDA(2) 1993), asumiendo que tales efectos serían mayores en un ambiente con baja calidad ambiental.

En un bosque o plantación forestal, al disminuir el vigor de los árboles por encontrarse bajo el efecto de diversos factores de estrés, aumenta la susceptibilidad del arbolado a ser atacado por patógenos; para Graham (1952) este concepto se refiere a la probabilidad de que un árbol de cierta edad o características (en diámetro o altura) sea infestado por algún patógeno de acuerdo a su estado fisiológico actual que favorece o dificulta su establecimiento.

El mismo autor reconoce 4 clases de riesgo: bajo, moderado, alto y muy alto; y establece la necesidad de realizar mapeos en diferentes zonas geográficas para identificar las regiones prioritarias y extrapolar los resultados a otras áreas menos vulnerables o de similares características, con el fin de realizar actividades de prevención o control de los patógenos y de recuperación del ambiente para disminuir el riesgo de una infestación o de que se presente un proceso de declinación forestal favorecido por la baja salud del ecosistema.

Los sistemas de evaluación de riesgo involucran la identificación de los agentes patógenos, así como de los factores fisiológicos y morfológicos del arbolado relacionados con las condiciones del sitio, esto conduce a que, dependiendo de las características bióticas y abióticas locales, existen áreas con mayor riesgo que otras. El

riesgo está asociado con la declinación forestal pues en una región donde existe un problema de esta clase aumenta la susceptibilidad de un ataque de plagas, que tienen menor incidencia en los bosques o plantaciones con buena salud forestal.

Al desarrollar los sistemas de evaluación de riesgo se debe considerar el efecto de los patógenos en el ecosistema a nivel económico, por la posible disminución en la calidad de los productos maderables o bien por la pérdida de especies que no pueden ser aprovechadas para la extracción de madera u otros derivados. Desde la perspectiva ecológica, el daño potencial de una infestación se estima por el impacto que ocasiona en el bosque en términos de la pérdida o reducción de especies clave, en la disminución de biodiversidad o en la posible desestabilización del ecosistema. Al considerar el efecto social, se tiene una repercusión negativa en el uso estético del recurso y una posible disminución en todos los satisfactores humanos que produce (cuadros 1 y 2). Por todo lo anterior, es necesario desarrollar sistemas de calificación que estimen el riesgo de infestación y establecimiento de patógenos en el ecosistema.

Para estimar la probabilidad de que una masa forestal sea infestada por una plaga se han desarrollado sistemas de evaluación de riesgo (Hamilton D.A 1988; Hamilton, D.A. y D.L. Wendt 1975; Hamilton, D.A. y B.M. Edwards 1976; Ferrell G.T. 1980; Ferrell G.T. 1986; USDA 1980; USDA(2) 1993; Mason *et al.* 1985) basados en características del sitio, del hospedante y del huésped; en otros casos se utilizan datos históricos (periodicidad de la plaga, intensidad del ataque, relación entre las condiciones del árbol y la infestación, correlación entre la intensidad del daño y el hábitat); o bien se emplean las características fisonómicas del arbolado para estimar la susceptibilidad del bosque utilizando indicadores ambientales de la salud forestal basados en los criterios de vigor descritos en los dos cuadros anteriores. Los sistemas de clasificación de riesgo han sido probados en varios estudios bajo distintas condiciones ambientales para evaluar la sensibilidad de los modelos y su valor predictivo con diferentes especies forestales.

Con los sistemas de clasificación de riesgo se realizan inferencias sobre la probabilidad de que ocurra un suceso de declinación utilizando variables ambientales, silvícolas o indicadores de vigor para estimar la salud forestal de un bosque natural o de una plantación en el momento actual y predecir la mortalidad que se presentará en el área. Para la estimación de los parámetros del modelo se utilizan diferentes indicadores

asociados a las características del ambiente (tipo de suelo, humedad, gases tóxicos, fauna, etc.); al final del proceso el modelo que se genera permite seleccionar las variables más importantes de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia del evento.

Uno de los modelos predictivos más utilizados es el de SCREEN; este sistema, escrito en FORTRAN IV, fue diseñado por Hamilton y Wendt (1975) con el fin de seleccionar las variables independientes que mejor predicen la respuesta de la variable dependiente dicotómica (solo dos valores posibles mutuamente excluyentes) y con ayuda de RISK, que es un programa de regresión no lineal que calcula los coeficientes de una función no logística, identificar las probabilidades de que ocurra un proceso de declinación en ciertas condiciones ambientales. Para la elección de las variables SCREEN utiliza un sistema de 8 clases discretas para categorizar cada variable independiente que después somete a un análisis de regresión logística.

En México ya se han realizado diversos estudios para validar los sistemas de clasificación de riesgo y evaluar la susceptibilidad al ataque de patógenos en varias zonas con problemas de declinación forestal o de presencia de plagas. En estos trabajos, realizados principalmente en los bosques del centro del país, se ha tratado de determinar los factores que participan en la declinación vinculándolos con los procesos productivos del bosque para disminuir el impacto económico de las plagas en el ecosistema; Paz (1989) utilizó un sistema de riesgo para predecir la muerte en un año del oyamel *Abies religiosa* en el Parque Nacional Desierto de los Leones, con este modelo seleccionó las principales variables implicadas en el proceso de declinación del bosque. En un trabajo anterior realizado por Espinoza y Muñoz (1988) se obtuvo un índice de riesgo económico para la Unidad Industrial de Explotación Forestal San Rafael con el que se elaboró una regionalización de las áreas de riesgo susceptibles a la infestación de descortezadores que fue incorporado en el proceso de toma de decisiones de la unidad industrial. Llanderal (1995) seleccionó las mejores variables predictivas de la mortalidad en dos especies de pino ubicadas en la Sierra de Nanchititla al sur del Estado de México; en sus resultados encontró que la pendiente, el volumen y el índice de sitio son variables que están fuertemente asociadas con el establecimiento exitoso de los descortezadores en la vegetación.

En nuestro país las investigaciones efectuadas en este rubro son relativamente nuevas y documentan el reciente interés en la protección forestal y la necesidad de profundizar en la problemática que padecen los ecosistemas dada su importancia económica y el continuo proceso de deterioro que los conduce a la disminución de la salud forestal y a una pérdida gradual de su productividad y de su diversidad biológica.

3.5. Eventos históricos de declinación forestal

3.5.1. Norteamérica y Europa Central y del Este

Existen numerosos casos documentados de declinación forestal en diferentes partes del mundo registrados desde la primera mitad del siglo XVII (Mackenzie J.J. y M. El-Ashry, 1989); en todos ellos intervinieron varios agentes causales de origen natural como plagas, enfermedades, competencia y factores edáficos que en conjunto promovieron el proceso de mortalidad del bosque. En la actualidad, los mecanismos de declinación que se han presentado desde la década de los 70's, se caracterizan por la participación de un factor más: la contaminación, que induce o acelera la declinación producida por otros agentes causales y cuya sintomatología difiere ligeramente de la producida por el efecto de los agentes naturales.

El mecanismo de la declinación forestal que actualmente afecta a diversas áreas naturales se caracteriza principalmente por la muerte en pie y la pérdida de follaje en árboles de diferentes clases de edad, especialmente en individuos adultos. En estas circunstancias la mortalidad es masiva y afecta a una gran extensión del bosque, la frecuencia de estos eventos es mayor en regiones próximas a las ciudades donde se registra un mayor número de casos de declinación forestal.

En las áreas boscosas cercanas a las ciudades la declinación forestal se ve facilitada por la acción del viento, el aumento gradual de la temperatura y la pérdida de recursos acuíferos; diferenciar los síntomas producidos por efectos naturales de los inducidos por actividades humanas requiere de mayor información sobre los

mecanismos que actúan en la vegetación para identificar con más precisión las relaciones de causa-efecto y reconocer si se trata de un proceso natural o de un desequilibrio del ecosistema inducido por el hombre (Johnson A.H. y T.G. Siccama, 1989).

En una revisión de los daños producidos en el arbolado por el efecto de los contaminantes atmosféricos, Mackenzie y El-Ashry (1989) afirman que el mayor número de casos de declinación se registra en Norteamérica y en el centro y este de Europa, principalmente en países como Estados Unidos, Alemania, Italia y Francia, que están altamente industrializados. En otras regiones con menor desarrollo tecnológico el problema de la declinación forestal se ha presentado más tardíamente o bien ha impactado geográficamente a áreas más reducidas, mientras que en otros casos la intensidad del daño en el bosque ha sido leve o moderada produciendo pocas pérdidas económicas.

En Estados Unidos la declinación ha ocurrido desde principios de los años 30's a la fecha, especialmente en California donde ha afectado regiones de bosque mixto en las montañas de San Bernardino, en un principio la muerte masiva de árboles se denominó **enfermedad x** pero posteriormente se identificó como un proceso de declinación de *Pinus ponderosa* y *Pinus jeffreyi*; en Florida, Georgia, las dos Carolinas y Virginia la declinación ha ocasionado pérdida de algunas especies de pino amarillo asociada a una disminución del crecimiento y al incremento de la mortalidad; mientras que en las Montañas Apalaches la especie principalmente afectada ha sido el pino blanco (*Pinus strobus*) (USDA 1988; Katovich S. y M. Mielke 1993); de acuerdo a Messenger y Stelford (1997) este árbol presenta el **"síndrome de declinación del pino blanco"** por su intolerancia ante ciertos factores ambientales físicos o químicos que lo hacen muy vulnerable en ciertos ecosistemas donde se presenta perturbación humana. En Canadá se tienen casos de declinación forestal en los grandes lagos, en Quebec y Ontario desde finales de los años 70's, en los cuales sufrió daño el maple de azúcar (*Acer saccharum*), que disminuyó su tasa de crecimiento, en consecuencia se produjo la muerte en pie de grandes masas forestales; esta especie también presentó declinación al este de los Estados Unidos, en los Estados de Vermont, Pennsylvania, Nueva York y Massachusetts. En la misma región se tienen registros de otras especies en declinación

desde 1960, entre ellas *Picea rubens* y *Abies balsamea*; en ambos casos la mortalidad del arbolado puede atribuirse a los patógenos y al cambio en las condiciones del ambiente que agudizaron el proceso de mortalidad a mediados de la década de los 80's (Smith D.M. 1976; Mielke *et al.* 1986).

En Europa Central los países que pasan por un proceso de declinación son Austria, Francia y Holanda que al inicio de los 80's presentaron pérdidas forestales del 22%, 26% y 29% de sus bosques naturales respectivamente. En Alemania, a finales de los años 70's se registró una disminución forestal en la Selva Negra donde árboles de las especies *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Fagus sylvatica* y *Abies alba* empezaron a manifestar un aumento de la mortalidad en pie además de una considerable disminución del follaje; a este suceso de declinación forestal se le denominó **waldsterben** (muerte del bosque) para diferenciarlo del proceso de mortalidad natural observada en años anteriores.

Coincidiendo con los autores anteriores, Huettl (1989) afirma que en regiones como los Países Bajos, Suiza y Dinamarca se tiene una menor pérdida de áreas boscosas por declinación, mientras que en Alemania, Gran Bretaña, Francia, Canadá y Estados Unidos la pérdida de cubierta forestal es un problema más severo que afecta fuertemente los recursos naturales de esos países.

Tainter F.H. y F.A. Baker (1996) realizan una revisión más actual donde registran la sintomatología de diferentes especies forestales afectadas por declinación. En este trabajo los autores mencionan la declinación forestal del oyamel en varios eventos periódicos ocurridos desde 1912 en Estados Unidos; para otras especies refieren el segundo tercio de este siglo para ubicar los primeros registros que se tienen de declinación forestal. Uno de los planteamientos que proponen para explicar este proceso es el incremento gradual de la temperatura que se ha producido desde hace aproximadamente 9,000 años, provocando un clima más cálido y seco; a este calentamiento natural de la atmósfera se suma el efecto de las actividades industriales y agropecuarias, así como el uso de fuego en las prácticas de caza y la sustitución de especies nativas por otras menos resistentes a las condiciones locales.

La declinación forestal es un suceso que continua afectando bosques urbanos y naturales en diferentes regiones del mundo; recientemente en Noruega, Fostad y Pedersen (1997) documentan un caso de declinación de arbolado urbano que mostró pérdida de vitalidad acompañada de los síntomas descritos en secciones anteriores (clorosis, caída de follaje, etc.) en individuos de *Acer platanoides*, *Aesculus hippocastanum* y en dos especies de *Tilia* ; en su trabajo refieren como posibles agentes causales el cambio de pH del suelo, la acumulación de sales, la reducción del espacio, los daños en el fuste y la variabilidad de las especies, esta última característica está asociada al potencial adaptativo y a la capacidad intrínseca de las especies para resistir los cambios del ambiente. Gleason *et al.* (1997). citan el amarillamiento del fresno (*Fraxinus sp.*) por disminución de la salud forestal en las ciudades de los Estados de Iowa y Wisconsin en Estados Unidos; en ambos casos se observó muerte de la copa y disminución del crecimiento en diámetro, en árboles con amarillamiento debido a infecciones por micoplasmas; en estas regiones ya se habían reportado con anterioridad casos de este tipo de infección, aunque es de relevancia el hecho de que esa especie de árbol en décadas pasadas presentó mayor tolerancia a dicha enfermedad.

3.5.2. La declinación forestal en México

En nuestro país a principios de la década de los 80's se iniciaron los primeros estudios en este campo, especialmente después de la mortalidad masiva de oyamel (*Abies religiosa*) que se registró en el Parque Nacional Desierto de los Leones ubicado al suroeste del Valle de México; entre los factores que contribuyeron a la declinación del arbolado se determinó que la contaminación por gases oxidantes había tenido un efecto negativo en el vigor de la vegetación y que los restantes factores ambientales tenían un papel secundario en este proceso (Alvarado R.D. 1989; Cibrián T.D. 1988; Paz E. D. 1989; Cielsa W.M. y S.Macías E. 1987).

En varias pruebas realizadas con anterioridad sobre el efecto del ozono y otros gases oxidantes en la vegetación (Bauer L.I. 1972; Hernández T.T. 1981; Bauer L.I. y Hernández T. 1986) encontraron que los gases emitidos por la ciudad de México tienen efecto fitotóxico por lo que producen daño en los cultivos o en los árboles sensibles a los contaminantes; estos resultados mostraron que existen plantas que pueden utilizarse como especies indicadoras de los niveles de contaminación y de sus posibles efectos sobre el ambiente, como son: la lechuga, la avena, el tabaco y el chile, entre otros. Respecto a las especies forestales que podrían ser útiles por su mayor sensibilidad al ozono se encuentran los pinos y los abetos (Hernández T. T. y L.I. Bauer 1989) que son algunos de los árboles más afectados por la declinación que registran los bosques en los alrededores de la ciudad de México; estos bosques muestran el daño de los gases fitotóxicos en la vegetación y el fuerte deterioro que producen en los ecosistemas. De acuerdo a lo anterior, Ojeda T. R. (1991) en un estudio sobre la influencia de los contaminantes en la vegetación, señala que los bosques de *Abies religiosa* y *Pinus hartwegii*, que rodean a la ciudad de México, son algunas de las especies forestales más afectadas por los contaminantes de origen fotoquímico, los cuales favorecen la disminución del crecimiento radial.

En México existen casos más recientes de declinación forestal en varios estados de la república (Cibrián T.D. 1991; Arechiga A.G. *et al.* 1997; Orozco T.F. 1997; López M.A. y R. Rivera 1995; Hernández R. 1995; UNAM 1993; Sosa C.M. 1995); estos eventos se han presentado principalmente en las cercanías de los centros urbanos; en dichas áreas se están efectuando estudios para identificar los posibles agentes causales que participan en el proceso de la declinación de estos bosques a la vez que se realizan evaluaciones fitosanitarias para seleccionar las variables sintomáticas más importantes y proponer técnicas de estimación de la salud forestal que puedan incorporarse a los inventarios y a estudios de impacto ambiental con el propósito de profundizar en las relaciones de causa-efecto que generan el deterioro de los bosques y proponer alternativas de manejo de las áreas naturales de nuestro país.

3.6. Monitoreo ambiental y salud forestal

En las secciones anteriores se ha enfatizado el reciente interés por evaluar la salud forestal y la calidad del ecosistema; este interés se fundamenta en la necesidad de proporcionar servicios a la población y en el continuo e intensivo deterioro que sufren los ecosistemas, el cual ha despertado la preocupación por mantener áreas naturales saludables y diversificadas, que garanticen la sustentabilidad de los recursos por varias generaciones.

En el ámbito forestal, antes de proponer planes de manejo y programas de mejoramiento ambiental se requiere conocer el estado fitosanitario de los bosques, sean naturales o cultivados, y con esta información delinear áreas de investigación desarrollando simultáneamente herramientas adecuadas para la toma y el procesamiento de los datos en diferentes regiones del país.

Para determinar la calidad del ecosistema y sus características, así como los factores de origen antropogénico que influyen en el ambiente, se utilizan programas de **monitoreo ambiental** que consisten en la medición continua y repetida de ciertos parámetros ecológicos o forestales para determinar las condiciones actuales del ecosistema, descubrir los cambios inusuales y las tendencias del bosque que permitan inferir sobre el futuro de los mismos para proponer planes y estrategias de recuperación de áreas naturales (USDA 1992).

Al realizar un programa de **monitoreo de la salud forestal** el primer paso es establecer las áreas prioritarias que requieren de mayor atención por manifestar una susceptibilidad más alta; lo que implica que con el transcurso del tiempo el grado de deterioro que presentarán se irá agudizando haciendo más lenta y costosa la recuperación ambiental. Una forma de seleccionar estas zonas es regionalizando por estados o bien por tipos de vegetación, considerando las áreas de amortiguamiento urbano y los bosques de interfase, que son masas forestales más susceptibles a presentar declinación por su proximidad a las ciudades. Estas regiones por su importancia ecológica y económica son un buen punto de inicio que ilustra la problemática a nivel nacional que puede presentarse en otras zonas.

Otros criterios para la selección del área de estudio se enlistan a continuación:

- **Presencia de endemismos**
- **Corredores biológicos**
- **Biodiversidad y riqueza de especies**
- **Reservas y Parques Nacionales: para la conservación de germoplasma**
- **Rentabilidad económica (productividad)**
- **Turismo**
- **Afectación en grupos sociales**

3.6.1. ¿Cómo es la salud forestal del ecosistema?

Después de establecer el área de estudio se deben determinar las condiciones ambientales del ecosistema, en esta fase es necesario establecer un esquema de muestreo, el cual debe ser adecuado a las características de la zona, y con ello se logra la identificación de los factores de disturbio que alteran la calidad del medio e inducen una disminución de la salud forestal. Para ello se utilizan **indicadores ambientales** como los descritos en el cuadro 2; estos indicadores se usan para evaluar la condición de vigor del bosque e inferir sobre la causa probable de esa condición. En este caso se recomienda realizar un sumario de los signos y síntomas de declinación del bosque para reconocer el patrón temporal y espacial del disturbio.

Simultáneamente con el levantamiento de información biológica se debe obtener un registro del clima, de la topografía, de los niveles de contaminación atmosférica, de las características del suelo, el uso de la tierra, entre otros factores; que solos o en conjunto, pueden ser causa de perturbación al actuar como agentes de iniciación, predisposición o contribución. La información recabada sobre los factores abióticos debe asociarse con las observaciones bióticas (tipo de bosque, crecimiento, plagas, cobertura vegetal, etc.) con el fin de detectar los cambios y tendencias del ecosistema forestal.

El establecer sitios de muestreo facilita el estudio continuo del bosque en el tiempo; la información recabada sobre el vigor de cada árbol individual proporciona evidencia de los procesos de declinación que se presentan así como de la calidad ambiental de la zona; lo que permite realizar comparaciones con otras regiones o sistemas de monitoreo, identificar impactos ambientales, detectar la aparición de enfermedades o plagas o proponer modelos de riesgo basados en la susceptibilidad de la masa forestal a ciertos agentes y por último determinar las tendencias del ecosistema. Estas investigaciones pueden ser de corto, largo o mediano plazo y realizarse en una sola estación por uno o más años.

3.6.2. Desarrollo de modelos predictivos e indicativos de la salud forestal

Al final de un proceso de evaluación ambiental en un bosque natural o cultivado se obtiene un listado de diversos parámetros fitosanitarios y de sus posibles factores causales. Con ellos se elaboran modelos predictivos o indicativos de la salud forestal en los que se seleccionan las variables más importantes de la condición de vigor, dichas variables se utilizan para detectar oportunamente los cambios que se presentan en el ecosistema forestal; así como predecir las tendencias futuras del área o de otra zona con características similares.

Con la información proporcionada por los modelos predictivos se realizan estimaciones de la probabilidad de un suceso de declinación forestal o bien de la susceptibilidad del bosque a las plagas o algún otro factor adverso mientras que con los modelos indicativos se establece el estado actual de vigor de la masa forestal y se determinan las condiciones fitosanitarias que prevalecen en el bosque (CFS(2) 1996, CFS(5) 1996); ambos tipos de modelos facilitan el manejo de las áreas naturales al hacer más eficiente el uso del ecosistema al seleccionar las zonas forestales o los árboles más vulnerables que deben ser extraídos a través de un adecuado manejo silvícola.

Con las variables seleccionadas por los modelos indicativos o predictivos de la salud forestal se elaboran **índices ambientales** que expresan la respuesta de la comunidad o del árbol ante los disturbios del ecosistema (Lewis *et al.* 1993); este tipo de índices utilizan datos de vigor (área foliar, crecimiento, macronutrientes en las hojas, etc.) o bien información de la estructura de la comunidad (diversidad, riqueza, abundancia, fauna silvestre). En su elaboración se usan las variables más significativas seleccionadas por los modelos; con ellas se busca establecer una relación entre los agentes causales y los factores bióticos/abióticos de la zona. De esta forma un índice ambiental es una función entre una o más de las variables seleccionadas (ejemplo: proporción de nitrógeno/fósforo; relación de ozono y temperatura; relación entre la defoliación y el diámetro de copa; relación entre la severidad del daño y el crecimiento de las ramas); como característica común los índices deben tener un bajo error de medición y ser estables en un periodo de tiempo determinado (pues varían al cambiar las condiciones del sitio) además de ser confiables en otros ecosistemas similares. El desarrollo de los índices ambientales es nuevo y requiere más investigación en diferentes condiciones para validarlos en distintos estudios de salud forestal.

Finalmente, una ventaja adicional de los modelos es su utilidad en el desarrollo de metodologías para la evaluación de la pérdida de vigor y el diagnóstico temprano del deterioro ambiental además de que permiten entender los mecanismos de causa-efecto que participan en la declinación forestal y reducir el efecto de los impactos causados por las actividades humanas.

3.6.3. Política ambiental y normatividad

Al término de los procesos descritos anteriormente, el monitoreo ambiental proporciona información para el desarrollo de programas de mejoramiento de la salud forestal y manejo de los recursos naturales; estos programas contribuyen a revertir el deterioro ambiental y a elevar la productividad del ecosistema al recuperar su calidad; estas acciones incluyen:

Actividades de tipo forestal:

- ✓ Prácticas silvícolas
- ✓ Manejo forestal
- ✓ Mantener masas forestales mixtas
- ✓ Prácticas de regeneración: uso de semillas locales
- ✓ Manejo y prevención de plagas
- ✓ Investigación del ciclo de vida de los patógenos
- ✓ Mejoramiento genético
- ✓ Control de especies exóticas (introducción)
- ✓ Recuperación de la fauna silvestre local
- ✓ Creación de brigadas y mecanismos para el control de incendios

Legislación y cooperación institucional

- ✓ Crear agencias de protección ambiental
- ✓ Creación de programas interdisciplinarios e interinstitucionales
- ✓ Desarrollo de proyectos entre instituciones y propietarios
- ✓ Promover la conservación y el cuidado de los recursos
- ✓ Planeación urbana
- ✓ Recuperar áreas urbanas: jardinería y paisajismo
- ✓ Reducir el vandalismo
- ✓ Disminuir la emisión de contaminantes atmosféricos
- ✓ Elaboración de productos químicos menos tóxicos
- ✓ Evitar la depositación de residuos químicos e industriales en ríos, mares y lagos
- ✓ Inspección aduanal: regulación de entrada y salida de productos forestales
- ✓ Creación de normas (legislación de la actividad forestal)

3.6.4. La evaluación de la salud forestal en México

En países industrializados como Estados Unidos, Canadá y Alemania existen programas de monitoreo de la salud forestal dirigidos a la recuperación de los bosques naturales y de los cultivados; estos programas son como los descritos en la sección anterior y son realizados por agencias especializadas, promoviendo el trabajo interdisciplinario y la transferencia de información entre instituciones y países.

En México, aún no existe una institución o agencia de ambiental que se encargue de desarrollar programas de monitoreo de la calidad del ecosistema basados en indicadores de la salud forestal. La Dirección General de Sanidad Forestal dependiente de la SEMARNAP (Secretaría del Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca) tiene a su cargo a la Subdirección de Sanidad Forestal donde actualmente se están realizando evaluaciones forestales que incorporan criterios fitosanitarios además de desarrollar normas oficiales para la regulación de importación y exportación de productos forestales. El incluir estos criterios en el levantamiento de la información forestal indica que ya se está gestando un marco teórico y legal adecuado a las necesidades del país y a su diversidad de ambientes y recursos naturales; sin embargo es sólo el inicio, ya que se requiere desarrollar e implementar metodologías apropiadas a los distintos tipos de vegetación de México considerando la variación topográfica y su diversidad, así como los factores de carácter social y económico que caracterizan a nuestro país.

De acuerdo a la revisión bibliográfica efectuada, en la **Figura 1** se esquematizan de manera general las etapas de un proceso de monitoreo ambiental partiendo del conocimiento y evaluación del ecosistema hasta el desarrollo de políticas de protección ambiental.

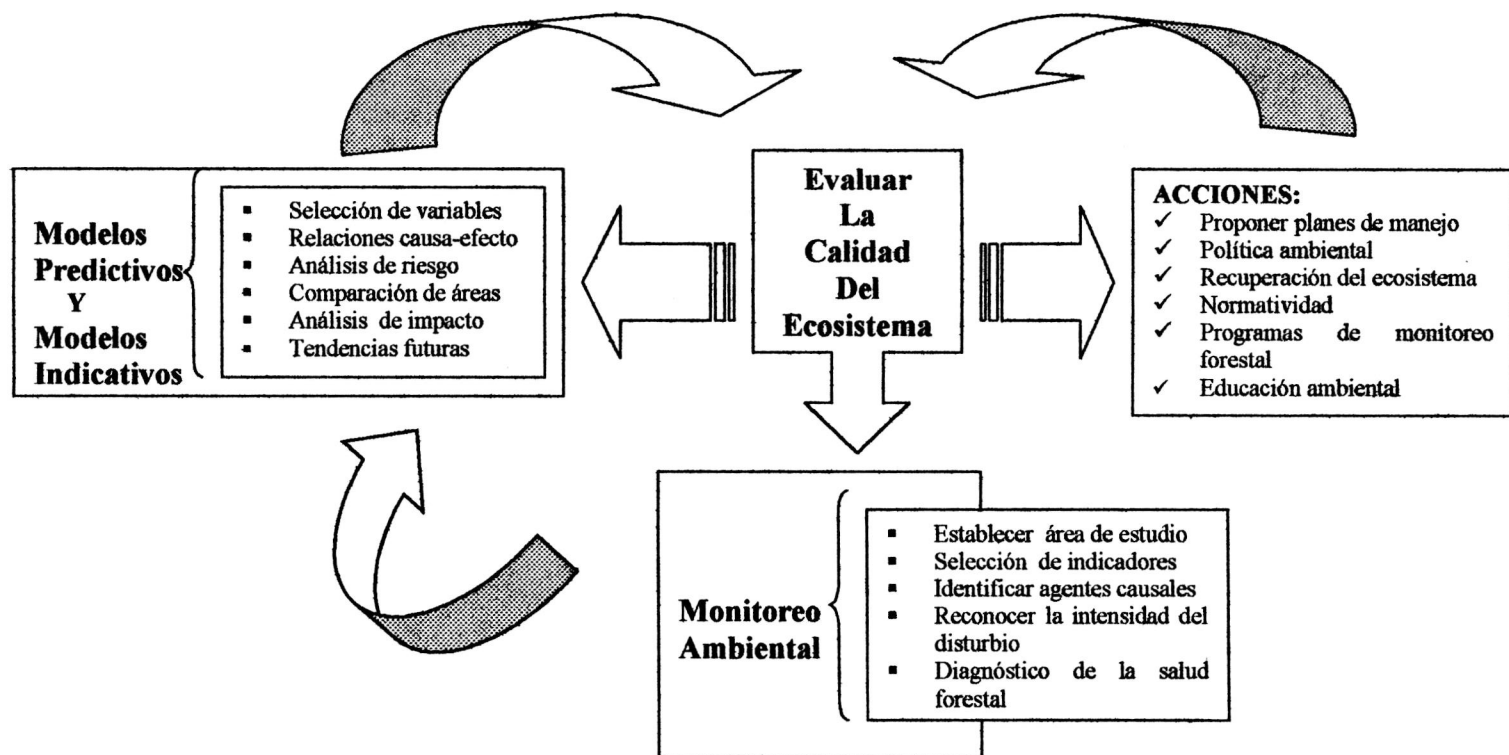


Figura 1. Diagrama general de un programa de monitoreo de salud forestal

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Descripción de las áreas de estudio

Zoquiapan

Para este trabajo se seleccionaron dos regiones boscosas próximas a la Ciudad de México. La primera de ellas, se ubica dentro de los límites de la Estación Forestal Experimental Zoquiapan (EFEZ), perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, en el Parque Nacional Zoquiapan, localizado en el límite del Estado de México y el Estado de Puebla en la región montañosa de la Sierra Nevada; al Este de la ciudad de México. Las coordenadas de la estación son: paralelos 19°12'30'' y 19°20'00'' de latitud Norte, y meridianos 98°42'30'' y 98°30'00'' de latitud Oeste. De acuerdo con García (1973) el clima es C(W)(w)(b)g'(w), que corresponde a templado subhúmedo, con régimen de lluvias en verano, con temperatura del mes más frío inferior a 18° C y superior a 3°C; temperatura media anual de 11°C a 13°C. La precipitación varía de 1000 a 1200 mm y está concentrada en los meses de junio a septiembre. Los suelos derivan de cenizas volcánicas y presentan un gran contenido de nitrógeno, calcio y magnesio; bajo contenido en fósforo; buena aireación y drenaje; su pH es ligeramente ácido; son suelos profundos con buena retención de humedad que favorece a los microorganismos.

Fisiográficamente es una región montañosa interrumpida por planicies con vegetación herbácea compuesta principalmente por los géneros *Mulhenbergia*, *Festuca* y *Cyperus*. En el estrato arbóreo predomina el bosque de pino en altitudes de 3000 a 3700 msnm siendo *Pinus hartwegii* la especie dominante, mientras que en las cañadas húmedas o en las laderas con pendiente pronunciada (superior al 50%) y con rango altitudinal de 3150 a 3500 msnm domina el bosque de *Abies*. En menor proporción se presentan asociaciones vegetales de pino-oyamel y bosques mixtos de pino, encino y aile (Zavala C.F. 1984, Blanco *et al.* 1981). Actualmente la Estación ocupa una superficie de 1600 has. dentro del Parque.

Ajusco

La segunda localidad se encuentra en el Parque Nacional de Ajusco, en el límite de la Delegación Tlalpan, al sur de la ciudad de México y del Estado de México, en los municipios de Santo Tomás Ajusco, San Miguel y San Nicolás Totolapan; la zona se ubica sobre la Sierra del Ajusco que forma parte de la Cordillera Neovolcánica y constituye el límite sur de la cuenca de México, entre los paralelos 19° 13'00" y 19° 14'15" de latitud Norte y los meridianos 99°14'45" y 99°16'45" de latitud Oeste. El clima, de acuerdo a la modificación de García, es del tipo templado húmedo con lluvias en verano distribuidas de junio a septiembre, con una estación seca de noviembre a mayo.

La zona colinda al Norte con la ciudad de México de la que recibe contaminantes acarreados por los vientos que circulan en dirección sur provenientes del Norte y Noreste; al sur se localiza el cono del volcán Xitle que dio origen al Pedregal de San Angel (Hernández T.T 1984; Espinosa R.G. *et al.* 1985). Los suelos son de origen volcánico, por lo que son ricos en nitrógeno y magnesio, con gran cantidad de materia orgánica.

Fisiográficamente, la región esta compuesta por laderas, colinas y planicies cubiertas de zacatonal rodeadas de manchones de bosque de pino, este tipo de vegetación se ubica en un rango altitudinal de 2250 a 3650 msnm. En la zona predomina el bosque mixto de pino y abeto, los manchones de bosque de abeto se ubican especialmente en las laderas húmedas por arriba de los 3000 msnm de altitud. En el sotobosque hay especies de gramíneas como *Muhlenbergia* y *Calamagrostis*, y arbustos del género *Senecio*.

4.2. Selección de sitios

Al inicio del estudio se estableció un esquema de muestreo y una selección de sitios adecuada a las condiciones de la zona y a los objetivos del estudio (Bennet D.P. y D.A. Humpries 1974; Brower *et al.* 1990; Schreuder *et al.* 1993; Sánchez *et al.* 1995); de esta forma, en ambas localidades se realizaron recorridos para seleccionar áreas de trabajo que mostrarán las siguientes características:

- a) exposición cenital
- b) pendiente cero
- c) poca cobertura de herbáceas
- d) baja pedregosidad
- e) parches de regeneración natural de *Pinus hartwegii*
- f) escasa o nula presencia de arbolado adulto
- g) densidad similar de árboles jóvenes
- i) pocos árboles maduros o sobremaduros

Posteriormente se establecieron 10 parcelas permanentes de 1/10 de ha (con radio de 17m) en un rango altitudinal de 3250 a 3380 msnm. En cada parcela se marcaron con pintura vinílica todos los árboles presentes desde 0.85m hasta 8.0 m de altura, realizándose visitas periódicas para la toma de datos de febrero de 1996 a enero del siguiente año.

Por otra parte, se seleccionaron aleatoriamente árboles adultos con evidencia de ataque de descortezadores. Por localidad, cada bimestre se derribó uno de los árboles seleccionados previamente, estos derribos se efectuaron desde el mes de julio hasta diciembre del mismo año. Los árboles derribados fueron cortados en trozas y mantenidos durante este periodo en cámaras de incubación en el **Insectario de la División de Ciencias Forestales**. Todo el material biológico que emergió fue colectado y preservado en alcohol al 70 % para su identificación ulterior.

4.3. Levantamiento de la información

De cada árbol de la muestra se obtuvo información de:

1. **La copa:** color, retención de follaje y condición de la punta.
2. **El fuste:** diámetro, altura, conformación, plantas parásitas y deformaciones
3. **El follaje:** longitud y manchados cloróticos

Los datos fueron agrupados en dos categorías para diferenciar el tipo de análisis a que se someterían más adelante, tomándose las siguientes observaciones de cada árbol de acuerdo al cuadro 3.

CUADRO 3. Clasificación de las variables utilizadas en el campo para el levantamiento de la información de acuerdo al tipo de análisis por aplicar

TIPO DE INFORMACIÓN	TIPO DE ANÁLISIS	PARÁMETRO	OBSERVACIÓN
	NO PARAMETRICO (VIGOR)	COPA Y FOLLAJE DEL ÁRBOL	color del follaje
			retención del follaje
			condición de la punta
			manchados cloróticos
		CONDICIÓN DEL FUSTE	presencia de plantas parásitas
			callos o canchros
	conformación		
	PARAMETRICO	DASOMÉTRICO	altura
			diámetro
			edad (de una submuestra)
		FOLLAJE	longitud
		BIOLÓGICO	riqueza y abundancia de especies de insectos descortezadores de pino (solamente en los derribos)

4.4. Parámetros de vigor

Para evaluar el vigor se consideraron simultáneamente variables de la copa, el fuste y el follaje, creándose para cada parámetro (color, retención de follaje, etc.) un sistema de calificación cualitativo basado en el aspecto del árbol. Así el vigor fue calificado de acuerdo a un sistema de clases discretas que crea una escala de valores de cero a seis aumentando progresivamente de uno en uno, asignando el valor más bajo a los árboles más sanos y el más alto a los árboles muy enfermos o moribundos (Dunning 1928, Ciesla W.M. y Hildebrand G. 1986, Graham 1951, Paz 1989, USDA 1994); de esta forma fue posible evaluar a cada árbol de la muestra por categoría de daño en función de su estado fitosanitario (cuadro 4).

Después de calificar el vigor de los árboles de la muestra (por color, forma de copa, retención de follaje, etc.) se le asignó a cada uno una calificación final: de **0** para árboles **sanos o vigorosos** y de **1** para los **no sanos** (la hoja de registro para la toma de información se anexa en el apéndice).

CUADRO 3. Criterios de calificación de las variables de vigor, que se utilizaron para evaluar el estado sanitario de árboles jóvenes (de 1 a 8 m de altura). Localidades de Zoquiapan, Edo. de Méx. y Ajusco, D.F.

VARIABLES DE LA COPA	CARACTERÍSTICAS	CONDICIÓN	CALIFICACIÓN
color del follaje	verde intenso a claro	muy sano	0
	verde amarillento	sano	1
	naranja u ocre	debilitado	2
retención del follaje (transparencia y hojas de más de 1 año)	75 % o más	excelente	0
	del 75 % al 50 %	buena	1
	50 % al 25%	mala	2
	25 % ó menos	pésima	3
condición de la punta	puntiaguda	con crecimiento	0
	redondeada	con menor	1
	muerta rebrotando	crecimiento	2
	muerta sin rebrotar	mínimo crecimiento sin crecimiento	3
grado de daño en la acícula	sin daño	ninguno	0
	menos del 20 %	leve	1
	20% a 40%	moderado	2
	del 41% al 60 %	grave	3
	del 60% al 80%	severo	4
	totalmente dañado	muy severo	5
VARIABLES DEL FUSTE	CARACTERÍSTICAS	CONDICIÓN	CALIFICACIÓN
conformación del fuste	fuste recto	sano	0
	con una bifurcación	débil	1
	polifurcado	muy debilitado	2
con callos, canchales o evidencia de descortezadores	ausencia	ningún daño	0
	presencia	con daño	1
calificación de Hawksworth, 1977¹ (para plantas parásitas)	grado de infestación de muérdago enano	excelente	0
		muy buena	1
		buena	2
		regular	3
		mala	4
		muy mala	5
		pésima	6

¹El sistema de calificación de Hawksworth (1977) evalúa cada tercio de la copa de acuerdo a la escala: muérdago no visible = 0; muérdago en menos del 50% del fuste = 1 ó muérdago en más del 50% del fuste = 2. La escala anterior se aplica en cada tercio del fuste y después se suma la calificación de los tres tercios para dar una calificación total.

4.5. Parámetros dasométricos y follaje

La altura y el diámetro normal (DAP) fueron medidos con pistola Haga y cinta diamétrica respectivamente. Para la longitud del follaje se tomaron muestras de hojas dañadas, las cuales fueron medidas con una regla de 30 cm y clasificadas en 6 categorías de daño de acuerdo al porcentaje de puntos cloróticos distribuidos a lo largo de la acícula. Para evaluar la intensidad del daño foliar se realizó una estimación del área de la hoja que presentaba manchados cloróticos con respecto a su largo total; de esta forma, cada hoja fue clasificada de acuerdo al cuadro 5.

CUADRO 5. Escala de evaluación del daño foliar de acuerdo al porcentaje de manchados cloróticos presentes en el follaje de los árboles de la muestra.

PORCENTAJE DE DAÑO EN LA ACÍCULA (respecto al largo total de la hoja)						
	sin daño	menor a 20%	de 20 % a 40 %	de 40 % a 60 %	de 60 % a 80 %	daño total
VALOR	0	1	2	3	4	5

Cada hoja fue dividida en cinco partes y en cada parte se estimaba el número de manchados cloróticos, en general el daño estaba muy localizado en la hoja lo que permitió una adecuada clasificación del grado de lesión observado; una vez que se determinaba el porcentaje de daño se calificaba a cada individuo asignándole el valor correspondiente. En ocasiones se encontraron hojas totalmente dañadas (valor de 5), mientras que en casos excepcionales algunas hojas no presentaban ninguna evidencia de daño por ozono (valor de cero), en ambos casos se creó una calificación para la condición de vigor: **sin daño** y **daño total** en la hoja, el valor correspondiente a cada caso aparece en el cuadro anterior.

4.6. Edad

Para su estimación se obtuvo una submuestra al azar de 40 árboles (4 por rodal) en cada localidad, de la que se extrajeron virutas con un taladro de Pressler para contar el número de anillos de las mismas. Con los datos de la edad se desarrolló un modelo de crecimiento con la información de la altura y el diámetro que fue utilizado para comparar ambas áreas de estudio.

4.7. Evaluación del vigor

Para la evaluación del estado sanitario de los árboles de la muestra se dividieron las variables de vigor en dos categorías: parámetros de la copa y parámetros del fuste. La descripción de la escala de calificación, así como de la forma en que se registraron las observaciones se explican más adelante.

4.7.1. Parámetros de la copa

Dentro de esta sección se incluyeron las observaciones de: color del follaje, retención de la hoja y condición de la punta.

4.7.1.1. Color

El color fue medido utilizando una **tabla de colores** diseñada en el laboratorio de entomología. Dicha tabla se basó en la guía de colores **PANTONE 96** y consta de una serie de 14 tarjetas que van de un matiz verde azulado al **marrón**; cada tarjeta contiene numerosos cuadritos de color que van de una luminosidad oscura a la clara; los tonos más oscuros se ubican en la parte superior izquierda de la tarjeta y se van haciendo más claros hacia la derecha y hacia abajo.

La primera serie de tarjetas está identificada con las letras: **A1, A2, A3 y A4** que corresponden al grupo de colores **verde azulado, verde brillante seco, verde seco claro y verde seco glauco I**. La segunda serie se identificó con las letras **B1, B2, B3 y B4** del grupo de colores que varían del verde al amarillo, por lo que se les nombró: **verde glauco II, verde amarillento, verde amarillento II y amarillo verdoso**. La tercera serie de tarjetas representa los colores que se acercan a los tonos más naranjas y están clasificados como **C1 y C2** para los colores **amarillo verdoso seco I y II**. Finalmente la cuarta serie corresponde a los colores ubicados del naranja al rojo identificados con las letras **D1, D2, D3 y D4** para los **ocres amarillos, naranjas y rojizos**, así como para los colores **marrón y sepia**.

Cada tarjeta es continuación de las tarjetas que aparecen previamente, por lo que el color del follaje, en general, se mueve de la primera serie (verdes) hacia la última (ocres); en el diseño de las tarjetas se consideró que los árboles más vigorosos se ubican en las primeras series de color, o bien dentro de las primeras letras de las dos primeras series (A1, A2, A3, A4, B1, B2) de acuerdo a la especie, desplazándose hacia las dos últimas series (C2, D1, etc.).

En las tarjetas aparece una línea vertical a la izquierda de cada conjunto de cuadritos; junto a la línea hay un número que va de **cero a dos** que representa el valor del color; el valor de **cero**, corresponde a los árboles **sanos**, el **uno** a los que manifiestan alguna disminución de vigor (que puede ser muy leve dependiendo de la especie) y el **dos** a los árboles enfermos o moribundos. En la parte derecha de cada tarjeta aparece el nombre del color al que corresponde la tarjeta (ejemplo: verde azulado, ocre, etc.). El usuario debe buscar la tarjeta que contenga los cuadritos con el color más parecido al color del follaje que va a observar, y con muestras de hojas localizar en la tarjeta el tono a que pertenece el color de las mismas; una vez que localiza el tono debe dar un valor al color de la hoja (de cero a dos) de acuerdo al número que aparezca en la línea vertical más próxima al conjunto de cuadritos donde ubicó a su muestra de follaje.

En este trabajo, para calificar el color del árbol en su totalidad se evaluó a cada tercio de la copa de la siguiente forma: se tomaron varias muestras de follaje de cada tercio del árbol; se ubicó en las tarjetas el color del follaje y el valor del tono (cero a dos) de las muestras observándose cual era el color más frecuente. Posteriormente se sumaron los tres valores de cada tercio y se le dio una calificación final a cada árbol.

Una vez identificado el color de las hojas en cada tercio del árbol; se aplicó la consigna de que para considerar el color del follaje como predominante, en la sección de la copa correspondiente, debía de haber más del 50% del follaje con ese color; como ejemplo puede mencionarse que existían árboles con más del 50% del follaje color verde brillante (valor uno) en dos tercios de la copa pero con más del 50% de hojas ocre (valor dos) en el último tercio; lo que daba una calificación total de cuatro al sumar los 3 tercios (la tabla de colores se anexa en el apéndice).

4.7.1.2. Retención del follaje

Para calificar este parámetro se dividió la copa de cada árbol en 4 partes; cada sección fue evaluada para detectar si existían acículas de uno o más años anteriores y asociarla a la transparencia de copa de acuerdo al cuadro 6.

CUADRO 6. Escala de calificación del vigor de acuerdo a la transparencia de la copa.

RETENCION DE FOLLAJE		
PORCENTAJE (transparencia de copa)	CONDICION	VALOR
75 % o más	Excelente	0
del 75 % al 50 %	buena	1
del 25 % al 50 %	regular	2
25 % ó menos	pésima	3

Primero se comparaba individualmente cada cuarto con la escala de cero a uno (árboles que conservan del 50% al 100% de su copa) para identificar a que clase de copa pertenecía el árbol; posteriormente, si el árbol tenía más del 50% de las hojas y eran de más de un año de edad (hojas de dos o tres años) se usaba la calificación de cero ó uno para toda la copa dependiendo de su transparencia; cuando el árbol observado tenía del 25% al 50% de su follaje y sus hojas eran del año actual se le calificaba como clase dos; y si el árbol tenía solamente un mechoncito de hojas menor o próximo al 25% del follaje total de la copa y hojas del año actual se calificaba como clase tres. Cabe mencionar que en ningún caso se observaron hojas de dos o más años en árboles con menos del 50% de follaje lo que permitió utilizar la metodología anterior sin generar confusión.

4.7.1.3. Condición de la punta

Se identificaron 4 categorías de punta descritas a continuación:

CUADRO 7. Tipos de punta más frecuentemente observados en ambas localidades y su calificación correspondiente para caracterizar el estado de vigor.

CONDICIÓN DE LA PUNTA		
FORMA	CONDICION	VALOR
puntiaguda	excelente	0
redonda	buena	1
rebrotando	regular	2
muerta	pésima	3

A cada árbol se le dio una calificación numérica de acuerdo a la forma de su punta que refleja el estado fitosanitario del árbol en términos de crecimiento; así los

árboles de punta puntiaguda se categorizaron como árboles con buen crecimiento que en general presentaban fustes rectos con buena conformación; los individuos con punta redondeada se identificaron como árboles con menor crecimiento al presentar un aplanamiento de la parte superior de la copa, estos árboles generalmente eran más pequeños y con forma de fuste variable (desde el recto al polifurcado); los árboles con punta rebrotando mostraron evidencia de algún daño (sea de origen natural o antropogénico) y se categorizaron como individuos de muy lento crecimiento con evidente reducción del vigor; siguiendo este criterio los árboles con punta tipo tres se calificaron como moribundos o muertos.

4.7.2. Variables del fuste

Las variables de vigor para las observaciones del fuste: **conformación** (recto, bifurcado o polifurcado), **daño físico** (por ataque de patógenos, actividad humana, evidencia de callos o canchales) e **infestación de muérdago**, fueron evaluadas tal como aparece en el cuadro 4, y para su calificación no presentaron mayor complejidad que describir individualmente a cada árbol asignándole un valor de **cero, uno o dos** de acuerdo al caso, salvo para el ataque de muérdago donde se utilizó el sistema de calificación de 6 clases de Hawksworth (1977). En todos los casos, el levantamiento de la información fue muy sencillo. Igual que para las variables de la copa, estas observaciones se sometieron a un programa para la elección de variables predictoras del vigor.

4.8. Evaluación de la biodiversidad de insectos descortezadores (Coleopera: Scolytidae)

De cada árbol derribado se midió la altura y el diámetro; posteriormente fueron cortados en trozas de 40 cm de largo y mantenidos en cubas dentro del insectario a una temperatura de alrededor de 28°C por periodos de 1 a 2 meses. Las ramas también se mantuvieron en cubas numeradas para reconocer a que parte de la copa correspondían (alta, media o baja). Todos los descortezadores que emergieron de las cámaras de incubación se preservaron en alcohol para identificarlos más tarde, registrando el número de cuba correspondiente.

El material biológico se preservó en alcohol al 70% y se determinó, a nivel de género y/o especie, en el laboratorio de la División. Parte del material, que no fue identificado hasta especie, se montó en seco en el Laboratorio de Entomología Forestal del Colegio de Postgraduados y otra parte, correspondiente a los insectos no descortezadores, se procesó con apoyo del Laboratorio de Entomología Agrícola del Departamento de Parasitología en Chapingo. En los dos primeros casos se identificó a los ejemplares a nivel de especie; mientras que en el último caso se determinó únicamente hasta familia.

A su vez, se realizó una consulta en la base de datos del laboratorio de entomología forestal del Colegio de Postgraduados, así como una revisión bibliográfica de las especies de descortezadores registradas en las colecciones del Valle de México en las dos áreas de estudio. Con el número de especies de cada localidad obtenido por esta fuente y con los ejemplares colectados en el trabajo de campo, se realizó un análisis de la biodiversidad de especies descortezadoras entre ambas áreas utilizando el **Índice de Shannon-Weinner** para tal efecto.

Los ejemplares colectados se incorporaron a la colección del Laboratorio de Entomología de la División así como a la del Colegio de Postgraduados, anexándose nuevos registros para el Ajusco.

4.9. Categorización de variables

Para realizar el levantamiento de la información y su procesamiento, se asignó un nombre a cada parámetro y una escala de valores discretos para las variables del vigor (al que ya se hizo referencia anteriormente); mientras que las variables continuas fueron reparametrizadas a un sistema discreto al realizar la primera etapa del análisis (pruebas no paramétricas) para poder incorporarlas al mismo. Posteriormente se efectuó un análisis en SAS con los datos de edad, altura y diámetro utilizando los datos en su escala original (valores continuos). En seguida se presentan dos cuadros con los nombres de las variables utilizados en la hoja de registro y los análisis, así como las clases discretas asignadas a cada condición de vigor. El primero contiene las variables cualitativas utilizadas en los análisis con el programa SCREEN y las pruebas no paramétricas y el segundo la reparametrización de las variables continuas.

CUADRO 8. Categorización de variables cualitativas utilizadas para evaluar el vigor en árboles jóvenes de 1 a 8 m de altura de *Pinus hartwegii*.

VARIABLES NO PARAMÉTRICAS			
Nombre	Condición	Descripción	Valor
Color (del follaje)	totalmente sano	verde intenso	0
	sano	verde claro	1
		verde limón	2
	débil	verde amarillo	3
	decayente	naranja	4
	moribundo	rojizo	5
	muerto	ocre	6
Hoja (retención)	totalmente sano	retiene casi 100%	0
	sano	cercano al 75%	1
	débil	cercano al 50%	2
	moribundo	menos del 25%	3
Punta (condición)	totalmente sano	creciendo	0
	sano	redonda viva	1
	débil	rebrotando con daño	2
	moribundo/muerto	solo un mechón vivo	3
Daño (en la acícula por puntos de ozono)	totalmente sano	acícula sin manchados	0
	sano	muy pocos puntos	1
		hoja < 40% punteada	2
	débil	más de 40% punteada	3
	decayente	casi toda con manchas	4
	moribundo/muerto	totalmente manchado	5

CUADRO 8. (Continuación)

VARIABLES NO PARAMÉTRICAS			
Nombre	Condición	Descripción	Valor
Grado (forma del fuste)	totalmente sano	fuste recto	0
	débil	bifurcado	1
	muy debilitado	polifurcado	2
Callos (lesiones en tronco)	sano	sin daño	0
	débil	fuste con lesiones	1
Denso (densidad de árboles)	sitio muy abierto	menos de 50 ind/ha	0
	abierto	de 50 a 100 ind/ha	1
	densidad regular	de 100 a 150 ind/ha	2
	muy denso	más de 50 ind/ha	3
Muerde (infestación de muérdago)	totalmente sano	sin ataque	0
	en un tercio de fuste	menos del 50%	1
	en un tercio de fuste	más del 50%	2
	dos tercios de fuste	uno con menos del 50% el otro con más del 50%	3
	dos tercios de fuste	ambos con más del 50%	4
	todo el fuste	2/3 con más del 50% uno con menos del 50%	5
	todo el fuste	los tres tercios con más del 50%	6

Las variables: **altura, diámetro y longitud de follaje** fueron reparametrizadas de acuerdo a la escala mostrada en el cuadro 9:

CUADRO 9. Reparametrización de variables continuas (altura, diámetro normal y longitud del follaje) a un sistema de clases discretas de 8 clases.

VARIABLES PARAMÉTRICAS		
Nombre	Valor original	Valor reparametrizado
ALT (altura de cada árbol)	menor a 1 m	0
	de 1 a 2 m	1
	2.1 a 3 m	2
	3.1 a 4 m	3
	4.1 a 5 m	4
	5.1 a 6 m	5
	6.1 a 7 m	6
	más de 7 m	7
DAP (diámetro normal)	hasta 3 cm	0
	de 3.1 a 6 cm	1
	de 6.1 a 9 cm	2
	de 9.1 a 12 cm	3
	de 12.1 a 15 cm	4
	de 15.1 a 18 cm	5
	de 18.1 a 21 cm	6
	más de 21 cm	7
Long (largo promedio de las acículas)	hasta 3 cm	7
	de 3.1 a 6 cm	6
	de 6.1 a 9 cm	5
	de 9.1 a 12 cm	4
	de 12.1 a 15 cm	3
	de 15.1 a 18 cm	2
	de 18.1 a 21 cm	1
	más de 21 cm	0

4.10. Análisis estadísticos

Las variables consideradas en este estudio se sometieron a diferentes tratamientos estadísticos de acuerdo al tipo de información que proporcionaban (Barnet V. y K.F. Turkaman 1995). Para ello, todas las variables se analizaron con el programa SCREEN para seleccionar a los parámetros más importantes que describían la condición de vigor de cada localidad, esto permitió eliminar de los posteriores análisis a las variables que aparentemente no proporcionaban información significativa e incluir en las pruebas estadísticas únicamente a aquellas variables que podían considerarse como predictivas del vigor observado.

El análisis con SCREEN permitió realizar un primer acercamiento a los datos de cada sitio e identificar las diferencias entre ellos en términos de variabilidad. Este programa también facilitó la interpretación de la información, al editar árboles de decisión que mostraban las relaciones existentes entre las variables, a la vez que proporcionó tablas de estadísticos indicando cuales de ellas eran significativas.

Al término de este proceso, a las variables seleccionadas, se les aplicó diferente tratamiento estadístico; la prueba utilizada para las variables no paramétricas fue la de Kruskall-Wallis, mientras que para las variables paramétricas se utilizó una prueba de Tukey; en ambos casos se efectuaron comparaciones entre los rodales de la misma localidad y entre localidades. Con los datos de la edad se estimó un modelo de crecimiento en altura para cada sitio. Finalmente, se efectuó una comparación de la diversidad de insectos descortezadores entre las dos comunidades. Los supuestos de estas pruebas, así como la forma en que se efectuaron los análisis, se describen más adelante.

En la figura 2 aparece un esquema general del tratamiento estadístico que se aplicó a los datos indicando las 3 etapas en que se efectuó el análisis: selección de variables significativas, comparación de las variables seleccionadas entre los rodales de la misma localidad y comparación de las mismas variables pero entre localidades. En el esquema también se señalan las pruebas estadísticas que se aplicaron en cada etapa del análisis.

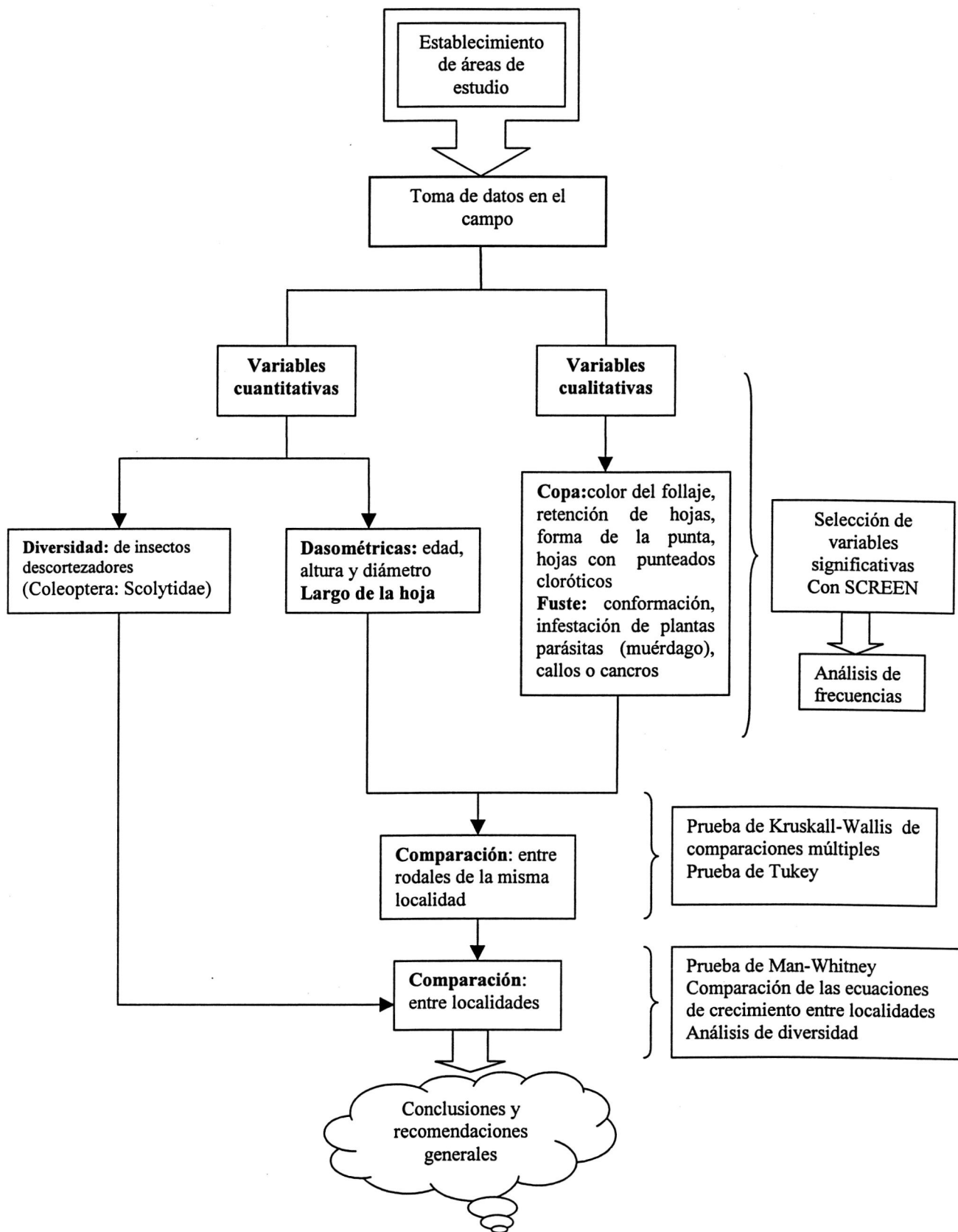


Figura 1. Esquema general de las diferentes etapas del análisis de los datos

5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

5.1. El Programa: SCREEN

Al final del trabajo de campo se obtuvo una muestra de **1985 árboles**, pertenecientes a ambas localidades: **867 para el Parque Nacional Zoquiapan y 1118 para Ajusco**. La información fue analizada con el programa de computo **SCREEN**, escrito en Fortran IV, que permite seleccionar las **variables más significativas** predictoras del modelo **al 95% de confianza** y proporciona una tabla de estadísticos con los valores de ji-cuadrada de cada variable independiente.

El programa acepta solamente observaciones discretas por lo que hay que categorizar las variables independientes en un sistema de 8 clases discretas como máximo asignándoles valores de 0 a 7 a criterio del investigador. La variable dependiente debe incluir únicamente 2 clases (ejemplo: vivo/muerto) para que SCREEN pueda construir un árbol de decisiones dicotómico que se explica más adelante.

Para trabajar SCREEN requiere de una tarjeta de control escrita en ASCII donde se indica: el número de variables y observaciones, las categorías (clases discretas) de cada variable, cual es la variable dependiente y cuales son las independientes, además de proporcionar los grados de libertad y señalar cuales variables serán excluidas del análisis. Los datos deben introducirse en un archivo también en ASCII, como observaciones discretas y sin espaciamiento entre ellos.

El criterio para la elección de las variables predictoras del vigor se basa en la tabla de estadísticos proporcionada por el programa en cada corrida. La tabla consiste de una serie de nodos (columnas) donde aparecen valores estimados de ji-cuadrada para cada variable; los nodos representan la "profundidad" o el número de ramas del árbol de decisión explicado en el siguiente párrafo. En la tabla el valor más alto se asigna a la variable más significativa y así sucesivamente hasta el cero que corresponde a las variables no significativas. Esto permite seleccionar las variables más importantes (que tienen los valores más altos de la tabla) y eliminar del análisis aquellas variables con valores pequeños o iguales a cero, además de facilitar un ordenamiento de las variables por su valor de predicción.

Con las variables predictivas SCREEN construye un árbol dicotómico de decisiones colocando a las variables de mayor valor de ji-cuadrada sobre la rama principal. A partir de la primera división, las observaciones se siguen reagrupando en ramificaciones secundarias más pequeñas de modo que las variables menos importantes van quedando en las últimas ramas. En cada división aparece una “caja” con dos números (uno arriba de otro) que representan las observaciones por variable independiente diferenciando cuantos individuos pertenecen a la condición descrita por la variable dependiente (sanos/enfermos); en las “cajas” los números entre corchetes junto a cada variable independiente indican el número de nodo en que aparece el valor de ji-cuadrada más alto dentro de la tabla de estadísticos. Para más información sobre este programa se sugiere consultar la fuente original (Hamilton *et al.* 1975; 1976 y 1988); y la tesis de Llanderal (1995) y Paz (1989).

5.1.1. Las tarjetas de control

Se elaboraron 3 tarjetas de control: una para cada localidad y otra para el análisis conjunto. Cada tarjeta de control inició con la primer corrida con todas las variables independientes, excepto la correspondiente al número de rodal (variable *sitio*) por no afectar en los resultados durante las pruebas preliminares (se obtenían las mismas salidas del programa al incluirla o no en el análisis); en las corridas sucesivas se fueron eliminando del análisis a las variables seleccionadas con anterioridad. El número de corridas por tarjeta es diferente en cada caso en función de las variables predictivas y de la terminación del programa que debía de ser del tipo 2 para obtener terminación correcta de la corrida.

En Ajusco se incluyeron en total 4 corridas diferentes, mientras que para Zoquiapan se realizaron 6 corridas y para el análisis conjunto 5. En todos los casos las últimas corridas no se incluyeron en la interpretación por obtenerse resultados muy similares a las corridas previas; no obstante, el incluir en las tarjetas de control a todas las variables seleccionadas permitió concluir las corridas con terminación correcta lo

que no se lograba al reducir el número de pruebas. Las tarjetas de control se anexan en el apéndice.

5.1.2. Selección de variables

Para analizar la información los datos fueron agrupados por localidad realizándose un análisis independiente en cada área de estudio (Ajusco, PNZ) así como un análisis conjunto con el total de los árboles de la muestra. En todos los casos se seleccionaron las variables independientes que aparecían en la rama principal del árbol de decisiones, así como las variables que tenían mayor valor en la tabla de estadísticos (Ferrell G.T. 1980, Hamilton D.A. y D.L. Wendt 1975). Esta selección se realizó bajo un **nivel de significancia del 95 %** estableciéndose el vigor como la variable dependiente con dos categorías de clasificación: **árbol sano y no sano**.

Las variables significativas seleccionadas en la primer corrida se fueron eliminando en las corridas posteriores de acuerdo al procedimiento de Hamilton (1988), quien sugiere eliminar del análisis las variables predictivas que han sido seleccionadas previamente. De acuerdo con este autor, el proceso anterior reduce el número de corridas y facilita la interpretación. Dado que existe independencia entre las variables, se asume que los resultados de la tabla de estadísticos también son independientes y al eliminar una variable del análisis el valor que proporciona SCREEN respecto a las variables restantes no debe modificarse salvo en el caso de que exista alguna relación entre ellas (Hamilton y Wendt, 1975). Lo anterior se aplica para los primeros nodos, pues los valores que asigna el programa a los siguientes nodos dependen de la elección de las variables en los nodos anteriores.

Dentro de cada “caja” del árbol de decisión se estimaron las tasas de arbolado enfermo respecto a la muestra y a cada caja. Este procedimiento se realizó dividiendo el número de árboles enfermos en cada caja sobre el total de árboles enfermos de la muestra, a través del mismo se pudo observar cual era la representatividad de cada variable seleccionada respecto a los datos. Por otro lado, al dividir el número de árboles enfermos sobre el total de árboles de cada “caja” se obtuvo la proporción del arbolado

en mala condición sanitaria asociado a la variable de vigor respectiva lo que permitió comparar entre “cajas” la tasa de árboles enfermos.

5.1.3. Variables seleccionadas

5.1.3.1. Ajusco

En esta localidad, la tabla de estadísticos que proporcionó SCREEN en cada corrida solo mostró 1 ó 2 nodos e incluyó en el análisis únicamente al **10%** de la muestra. Las variables predictivas seleccionadas por orden de importancia fueron: **hoja, color, punta y grado**; los valores de ji-cuadrada de estas variables aparecen en el cuadro 10 resaltados en negrillas.

CUADRO 10. Variables seleccionadas por el programa SCREEN en la localidad del Ajusco.

PRIMER CORRIDA		
Localidad: Ajusco		
VARIABLE	NODO	
	1	2
sitio	0.00	0.00
DAP	0.00	0.00
altura	0.00	0.00
color	5.66	8.40
hoja	0.00	10.00
punta	0.00	5.28
daño	0.00	0.00
longitud	0.00	0.00
grado	0.00	3.18
muerde	0.00	0.00
callo	0.00	0.00
vigor	0.00	0.00
densid	0.00	0.00

En todas las corridas el árbol de decisión fue muy pequeño y sencillo e incluyó solo dos ramas. La primer “caja” etiquetada como **vigor** contiene la información del número de observaciones en la categoría: **sano o enfermo**; en ella SCREEN indentificó a 73 individuos sanos y a 38 enfermos. La rama principal dividió estas observaciones por la **retención de la hoja** agrupando dos clases de individuos: 84 árboles sanos con excelente/buena retención y 27 enfermos con pésima/fatal retención del follaje. La segunda variable explicativa para la retención del follaje fue **color**, que agrupa las observaciones en dos clases: 69 árboles sanos de excelente retención, con hojas de color verde intenso al verde claro y 4 enfermos con igual retención pero con follaje verde limón; mientras que en la caja inferior se identificó a 3 árboles con retención buena y color de follaje naranja así como a 8 árboles con igual tipo de retención pero hojas más ocre (figura 3).

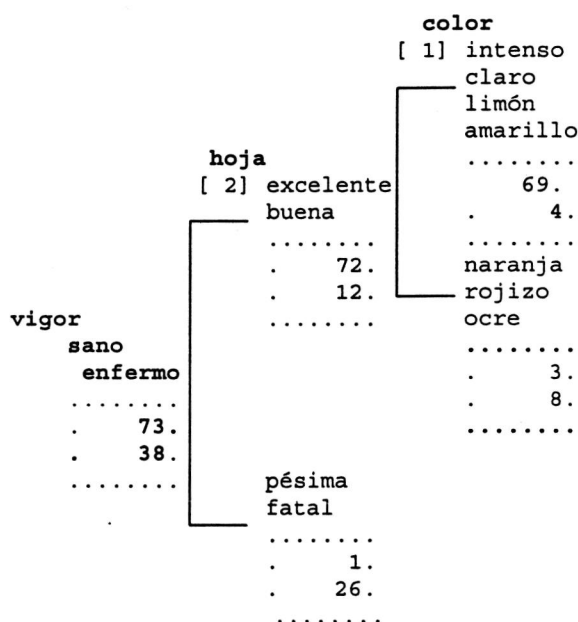


Figura 3. Árbol de decisiones de la primer corrida de SCREEN con las variables de la localidad de Ajusco.

Al estimar las tasas de arbolado enfermo en la muestra se encontró que el **68%** de las observaciones analizadas por el programa presentaron una retención del follaje muy baja (variable **hoja**) y que cerca del **40%** manifestaba **daño en la punta**. Al revisar los resultados por caja, la variable **hoja** también fue la que presentó mayor tasa de individuos enfermos, registrando una proporción del **43%** respecto a los individuos sanos.

En las subsecuentes corridas, al ir suprimiendo las restantes variables seleccionadas con anterioridad, se obtuvieron resultados muy similares; es decir en todas las pruebas se seleccionaron las variables en el mismo orden de predictibilidad y solamente hubo ligeras variaciones en el árbol de decisión correspondiente a cada corrida; con estos resultados se concluyó que cerca del **70%** de los árboles tenían color de follaje del naranja al ocre, siendo ésta la caja donde se encontró una mayor proporción de árboles enfermos (**88%**); y que solamente el **6%** de la muestra analizada tenía alguna lesión o deformidad en el fuste. Por otro lado, en Ajusco aparentemente existe independencia entre las variables predictivas dado que al eliminarlas una a una en las corridas no manifestaron ningún cambio en el valor de ji-cuadrada de la tabla de estadísticos.

Al comparar los resultados de las dos áreas de estudio se concluyó que la variabilidad de Ajusco es menor a la de Zoquiapan. El argumento anterior se basa en la redundancia de los resultados de cada corrida y en el número de variables predictoras seleccionadas para explicar el vigor en Ajusco, así como en los árboles de decisión proporcionados por el programa que únicamente mostraron dos ramas y en ocasiones solo una, además de que en las salidas, al editar la tabla de estadísticos, SCREEN solo seleccionó dos nodos como máximo en cada corrida.

La poca variabilidad de Ajusco también se reflejó en el número de observaciones consideradas en el análisis que incluyó solamente al 10% de la muestra. Una observación implícita es que, para el caso de Ajusco, el muérdago no es una variable de importancia que afecte el vigor de los árboles, pues en ninguna de las corridas fue considerada por el programa, que incluso ni siquiera le asignó un valor numérico en las tablas de estadísticos. En dichas tablas todas las variables presentaron valores de ji-cuadrada iguales a cero (excepto las seleccionadas) mostrando que faltó realizar una

categorización más fina de los parámetros o bien que el sistema, por agentes externos (actividad humana, incendios, contaminantes, etc.) ha ido perdiendo complejidad que se refleja en la paulatina pérdida de vigor y en una relación más lineal de las variables ambientales que lo componen (sean o no de carácter biológico), estas relaciones pueden expresarse como un proceso de causa-efecto, donde la acción de un agente (por ejemplo la presencia de gases oxidantes) debilita al árbol y le ocasiona la reducción del vigor (manchados cloróticos y caída de hojas), que en el caso de ecosistemas más diversificados no podría explicarse de una forma tan directa, lo que establece que la relación de las variables sea más compleja y se refleje en los gráficos que proporciona el programa.

5.1.3.2. Zoquiapan

Para el caso de la Estación Forestal se realizaron 5 corridas; la primera incluyó todas las variables que sucesivamente se eliminaron de cada prueba por orden de predictividad. En la primer corrida se seleccionaron las siguientes variables de mayor a menor importancia: **hoja, punta, muerde, grado, color y daño** (cuadro 11), este análisis se efectuó con el **94.23%** de los datos de la muestra.

CUADRO 11. Resultados de la selección de variables con el programa SCREEN en Zoquiapan.

PRIMER CORRIDA Localidad: Zoquiapan						
VARIABLE	NODO					
	1	2	3	4	5	6
sitio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DAP	2.16	0.00	5.40	1.99	0.00	2.28
altura	2.53	0.00	5.83	0.00	1.78	2.04
color	0.00	5.56	2.20	11.91	3.27	1.61
hoja	0.00	0.00	0.00	18.83	0.00	0.00
punta	0.00	8.38	0.00	14.71	4.73	0.00
daño	3.57	4.16	4.39	10.88	0.00	0.00
longitud	2.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
grado	0.00	10.22	0.00	13.10	6.54	0.00
muerde	13.41	0.00	3.02	5.70	5.24	8.00
callo	0.00	1.48	0.00	3.16	0.00	0.00
vigor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
densid	5.50	0.00	4.13	2.33	0.00	0.00

El árbol de decisión contempló a **830** datos de los cuales **550** fueron árboles sanos y **280** enfermos; en la rama principal las observaciones se dividieron por la retención de la **hoja** en tres clases: 514 árboles con excelente/buena retención, 267 con retención pésima y 49 con retención fatal. Siguiendo las ramificaciones secundarias del árbol de decisión se observó que la retención del follaje se asoció con la infestación de muérdago (variable **muerde**), así el programa diferenció dos grupos de individuos dependiendo de la intensidad de ataque de esta planta parásita: árboles levemente infestados (con ataque del tipo 1) y árboles con mayor grado de infección (del tipo 2 a 6); al primer grupo correspondieron los árboles ubicados en las ramas más altas del árbol de decisión, que fueron en general los individuos sanos o los que manifestaron menor pérdida de vigor (**figuras 4 y 5**).

```

muerde
[ 1] clase1
.....
. 372.
. 6.
.....

grado
[ 2] presente
.....
. 409.
. 40.
.....

hoja
[ 4] buena
.....
. 439.
. 75.
.....

vigor
sano
enfermo
.....
. 550.
. 280.
.....

clase2
clase3
clase4
clase5
clase6
.....
. 37.
. 34.
.....

densid
baja
media
.....
. 12.
. 32.
.....
alta
elevada
.....
. 25.
. 2.
.....

ALT
[ 3] menos 1
.....
1 a 2
2 a 3
.....
. 30.
. 18.
.....

ausente
.....
. 30.
. 35.
.....

densid
baja
media
.....
. 2.
. 8.
.....
alta
elevada
.....
. 28.
. 10.
.....

3 a 4
4 a 5
5 a 6
6 a 7
7 a 8
.....
. 0.
. 17.
.....

```

65

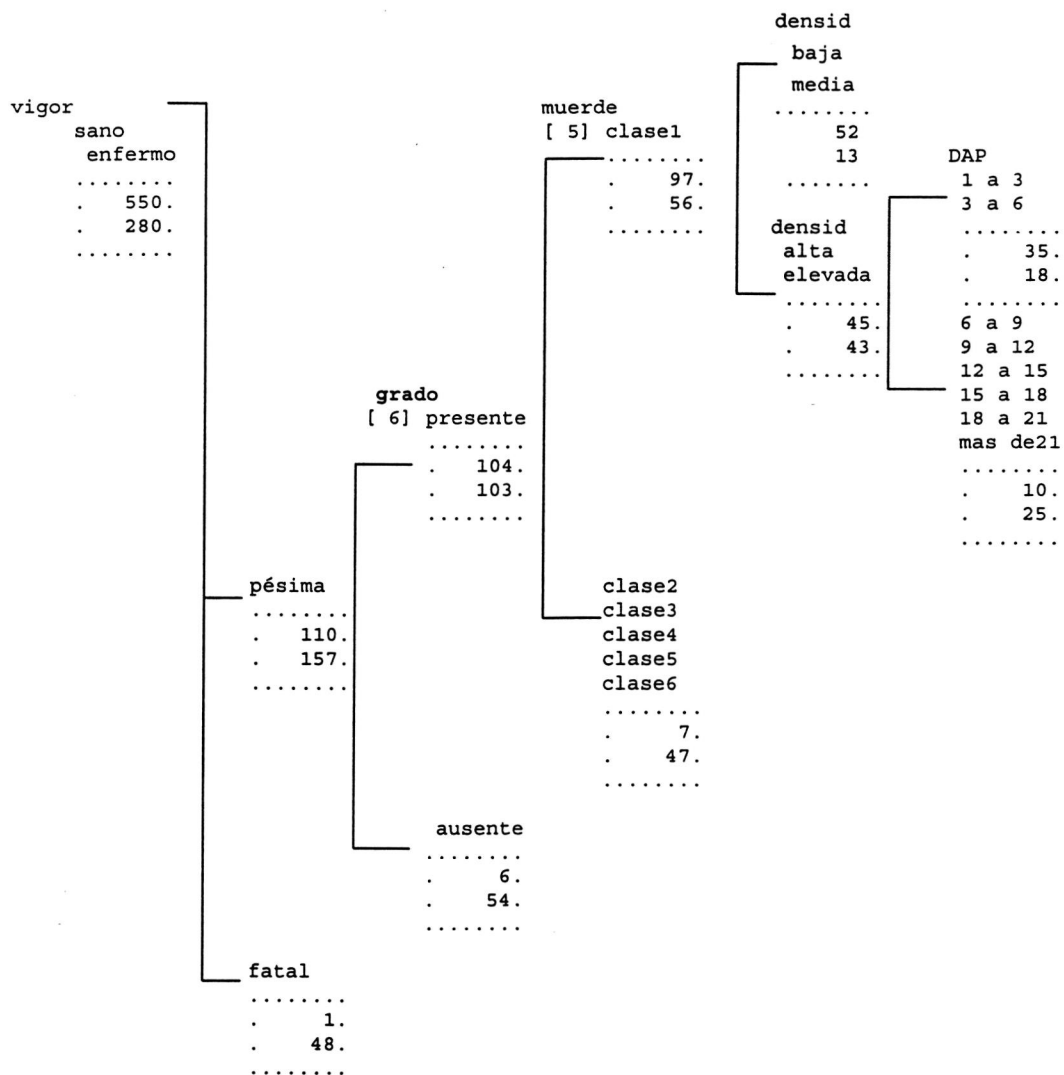


Figura 5. Ramas inferiores del árbol de decisión de Zoquiapan.

De acuerdo al gráfico, uno de los factores ambientales que afectaron la retención de la hoja fue la densidad de individuos (variable **denso**) que también se asoció con el diámetro del arbolado. Por otro lado, también se observó un incremento en la infestación de muérdago en árboles ubicados en rodales de elevada densidad especialmente en individuos de mayor diámetro, lo que implicó que los árboles jóvenes de menor talla fueron comparativamente más vigorosos que los de mayor edad. Los resultados mostraron que los individuos más sanos presentaron diámetros menores lo que se

explica por el menor tiempo de exposición de estos árboles ante factores negativos que causan el debilitamiento y la subsecuente disminución del vigor; lo que hace suponer que aun no se manifiestan los posibles síntomas o signos que generan estos agentes sobre el arbolado joven.

Al estimar el porcentaje de árboles enfermos en la muestra, se obtuvo que el **56%** presentaron pésima retención del follaje con algún tipo de daño en el fuste, así mismo el **16.8%** de los árboles con estas características padecieron un mayor ataque de muérdago enano. Dentro de las cajas, la mayor proporción de árboles enfermos (**97.6%**) se ubicó dentro de la variable **hoja**.

En el segundo análisis (que se efectuó sin la variable **hoja**), la variable **muerde** fue la única que se modificó, disminuyendo de **13.41 a 11.61**, este resultado mostró que existe una relación entre la retención de follaje y la infestación de muérdago. En esta corrida, los resultados mostraron que los árboles menos vigorosos se caracterizan por lesiones en la punta, daño en el fuste y las hojas e infestación de muérdago, asociados a su ubicación en rodales de alta densidad. En este caso se identificaron 2 conjuntos de árboles: individuos sanos de follaje verde intenso al claro e individuos débiles con follaje verde limón al ocre, a este segundo grupo correspondió un porcentaje de árboles enfermos cercano al **10%** mientras que en el primero la tasa fue inferior al **1%**. Los árboles más vigorosos presentaron punta con crecimiento, leve (o ninguna) infestación de muérdago, fuste recto, daño en follaje menor al 50% y color de la copa verde intenso/claro; los individuos con estas características se ubicaron en rodales de densidad baja o media.

Por otro lado, el **27.9%** presentó ataque leve de muérdago (clase 1) y el **27.2%** mostró una afectación más severa (clases 2 a 6); de ello se concluyó que cerca de dos tercios de la muestra están afectados por esta planta parásita que reduce el vigor de su hospedero; dentro de este mismo grupo se obtuvo que el **37.3%** de los árboles presentaron daño en el follaje superior al 50% (a lo largo de la acícula). En todos los casos el color del follaje dominante en el arbolado enfermo oscilo del verde limón al ocre.

En la tercer corrida al excluir a **hoja y punta**, la mayoría de las variables no se modificaron excepto **muerde** que aumentó de **11.61 a 15.88** reflejando que existe una

relación entre el estado de la punta y la infección de muérdago; al registrarse un porcentaje del **20%** de árboles de la muestra con punta redonda a muerta y con infección de muérdago, que a su vez está asociado a las lesiones del tronco. Por otro lado se encontró que cerca de dos tercios de la muestra (**61.1%**) tiene acículas entre 12 cm y 21 cm de largo; en el grupo de individuos con hojas inferiores a los 12 cm de largo se detectó el **53.5%** de árboles enfermos con daño en la acícula superior al 50% mientras que para árboles con hojas mayores a 12 cm la tasa de individuos afectados se reduce al **34.3%**.

Respecto al resto de las variables, las demás pruebas mostraron que existe independencia entre ellas dado que ninguna sufrió modificaciones posteriores. Con el resultado anterior se concluyó que las variables seleccionadas en los análisis previos eran las únicas significativas al 95% de confianza y que las restantes variables carecían de predictibilidad para categorizar el estado fitosanitario de los árboles de la muestra.

5.1.3.3. Análisis conjunto

Los dos conjuntos de datos: **Ajusco y Zoquiapan** fueron unificados y sometidos a los mismos tratamientos para su análisis. Los resultados que reportó SCREEN fueron muy similares a los de Zoquiapan, obteniéndose árboles de decisión muy complejos y tablas de estadísticos con más de siete nodos en todas las corridas. Con lo anterior se concluyó que la variabilidad de Zoquiapan es mayor a la de Ajusco, dada la complejidad de los resultados, proporcionada principalmente por las observaciones de la Estación Zoquiapan.

Las variables seleccionadas fueron: **hoja, daño, punta, color y grado**. En este análisis no se seleccionó a **muerde** como variable de importancia; al parecer el resultado anterior es un efecto del vigor del arbolado en Ajusco, donde el ataque de muérdago no está muy extendido. Los valores de ji-cuadrada reportados por el programa aparecen en el cuadro 12. Los valores de ji-cuadrada que tomaron las variables de importancia se duplicaron respecto a los dos análisis anteriores pero manteniendo casi el mismo orden de predictibilidad.

CUADRO 12. Variables significativas del análisis conjunto.

PRIMER CORRIDA DEL ANÁLISIS CONJUNTO							
Localidades: Ajusco y Zoquiapan							
VARIABLE	NODO						
	1	2	3	4	5	6	7
sitio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DAP	0.00	0.00	1.61	4.85	0.00	0.00	0.00
altura	0.00	0.00	0.00	6.05	3.97	0.00	0.00
color	8.82	4.51	3.11	24.29	8.16	4.85	0.00
hoja	0.00	0.00	0.00	34.14	0.00	0.00	0.00
punta	10.09	0.00	0.00	24.76	8.41	4.25	1.80
daño	0.00	0.00	0.00	25.63	0.00	0.00	0.00
longitud	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
grado	9.50	7.12	2.71	17.55	10.72	0.00	0.00
muerde	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.24	0.00
callo	1.44	0.00	0.00	7.90	3.58	3.28	0.00
vigor	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
densid	0.00	0.00	0.00	2.59	1.78	0.00	5.11

En el árbol de decisión se incluyó a **1862** observaciones que representan a **1124** individuos sanos y **738** débiles o enfermos; estos datos representan el **95%** de la muestra. En el gráfico SCREEN distribuye la información en 3 categorías de retención de follaje (variable **hoja**) asignando a **1171** con excelente/buena retención, **557** con pésima retención y **134** con retención de follaje fatal; los resultados indican que solo una parte de la muestra está en los extremos (sanos o muy enfermos) y que la mayoría se ubica en condiciones sanitarias regulares (retención pésima y regular de follaje), así menos del **50%** de los datos fue considerado como débil/enfermo (**figuras 6 y 7**).

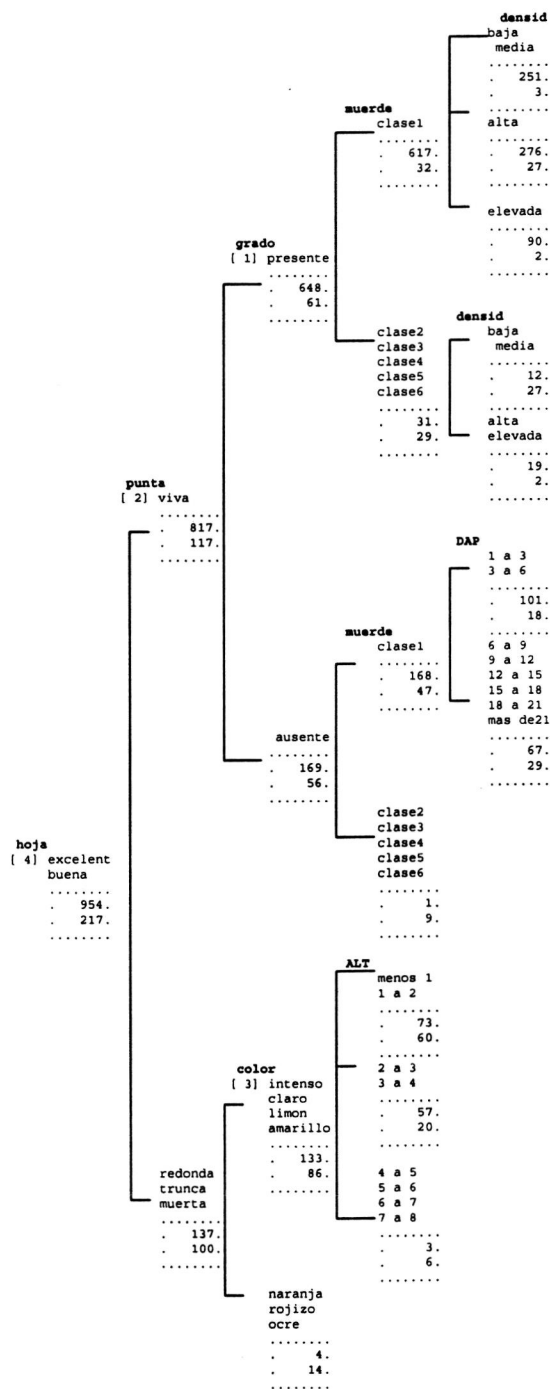


Figura 6. Árbol de decisión del análisis conjunto (ramas superiores).

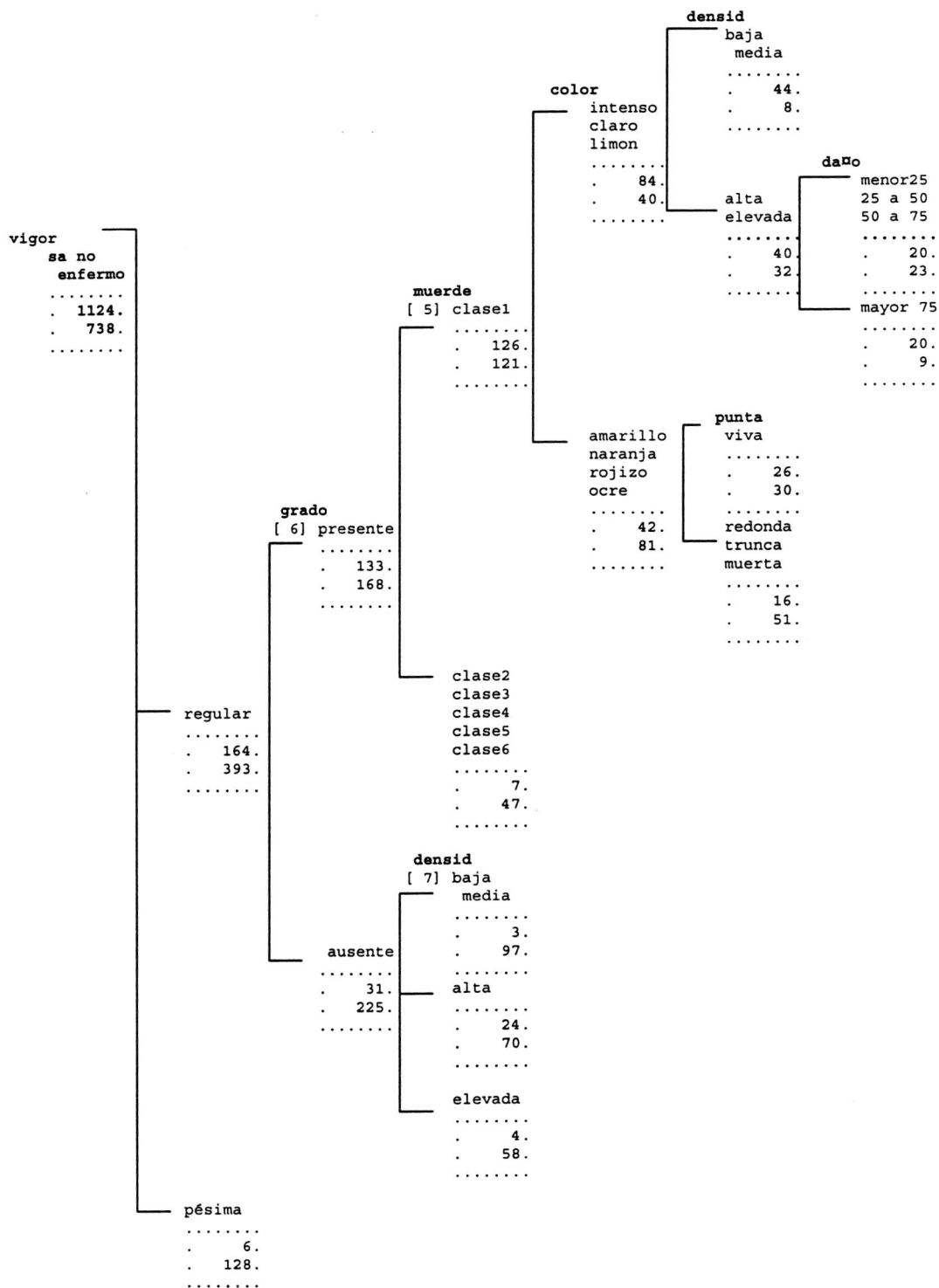


Figura 7. Árbol de decisión del análisis conjunto (ramas inferiores).

De los individuos enfermos en la muestra el **58%** presentó mala retención de follaje, mientras que el **25%** mostró algún tipo de deformación en el fuste y el **28.2%** tuvo la punta dañada. El daño en la hoja fue la segunda característica fitosanitaria más frecuente en el arbolado enfermo, que mostró el **47%** de los individuos con lesiones en la acícula del 50% al 75% de su superficie y el **43%** con lesiones arriba del 75%.

Inicialmente el programa identificó dos clases de observaciones de acuerdo al color del follaje: árboles de color verde intenso al amarillo y árboles de color naranja al ocre; en ambos casos no se estableció una diferencia clara para distinguir que color correspondía a los individuos sanos o los enfermos. Sin embargo, desde el segundo análisis SCREEN reconoció a 3 grupos de individuos: árboles sanos con follaje verde intenso al limón, árboles semi débiles de color amarillo al naranja y árboles enfermos o moribundos de color rojizo u ocre, a estos últimos los situó siempre en las ramas bajas del árbol de decisión; y fue bajo la categoría de follaje ocre que el programa ubicó a todos los árboles infestados de muérdago y punta dañada donde no se registró a ningún árbol sano.

En las últimas pruebas, al eliminar a las variables predictoras seleccionadas para Ajusco, la variable **muerde** cambió su valor inicial de **0.00 a 11.33** en la tercer corrida y de **0.00 a 10.42** en la cuarta; de lo que se desprende que el programa basó el resultado principalmente en los datos de Zoquiapan donde la infestación de muérdago es un problema muy serio que afecta fuertemente el vigor del arbolado de la localidad. El porcentaje de árboles atacados por muérdago se redujo considerablemente al **15%** en la muestra conjunta comparado con los casi **dos tercios** que se registraron en Zoquiapan mostrando así el efecto de las observaciones de Ajusco en el análisis.

Finalmente, al retirar a todas las variables importantes seleccionadas en la primer corrida, el programa construyó un árbol de decisión y una tabla de estadísticos basados en la **longitud del follaje, el diámetro y la altura**, que fueron las variables consideradas en los análisis paramétricos.

5.2. Análisis de frecuencias

5.2.1. Variables no paramétricas

Algunas de las variables seleccionadas por SCREEN se sometieron a un análisis de frecuencias en SAS para determinar el número de individuos en cada clase discreta y poder comparar gráficamente entre las dos áreas de estudio. Los resultados se presentan por localidad en los siguientes cuadros:

CUADRO 13. Resultados del análisis de frecuencias para las variables seleccionadas por SCREEN en la localidad de Zoquiapan.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS Localidad: Zoquiapan					
CLASE	VARIABLES				
	COLOR	HOJA	PUNTA	DAÑO	GRADO
cero	86	71	646	8	696
uno	293	477	184	157	134
dos	270	270	27	411	37
tres	181	49	10	255	-
cuatro	33	-	-	35	-
cinco	2	-	-	1	-
seis	2	-	-	-	-

CUADRO 14. Resultados del análisis de frecuencias para las variables seleccionadas por SCREEN en la localidad de Ajusco.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS Localidad: Ajusco					
CLASE	VARIABLES				
	COLOR	HOJA	PUNTA	DAÑO	GRADO
cero	25	77	681	0	446
uno	144	602	351	104	510
dos	301	354	39	463	162
tres	416	85	47	369	-
cuatro	154	-	-	172	-
cinco	58	-	-	10	-
seis	20	-	-	-	-

5.2.1.1. Color

Gráficamente los resultados mostraron que el color predominante en Zoquiapan es el **verde claro** (clase uno) y en Ajusco es el **verde amarillo** (clase tres). Para la primera localidad la mayor parte de las observaciones se distribuyeron del color **verde claro al verde amarillo** (clases uno a tres); mientras que en la segunda se ubicaron en la gama del **verde limón al naranja** (clases dos al cuatro). La gráfica de frecuencias expresada en porcentaje aparece en la **figura 8** (en todas las subsecuentes gráficas, los números arriba de cada barra indican la frecuencia de observaciones en cada clase discreta).

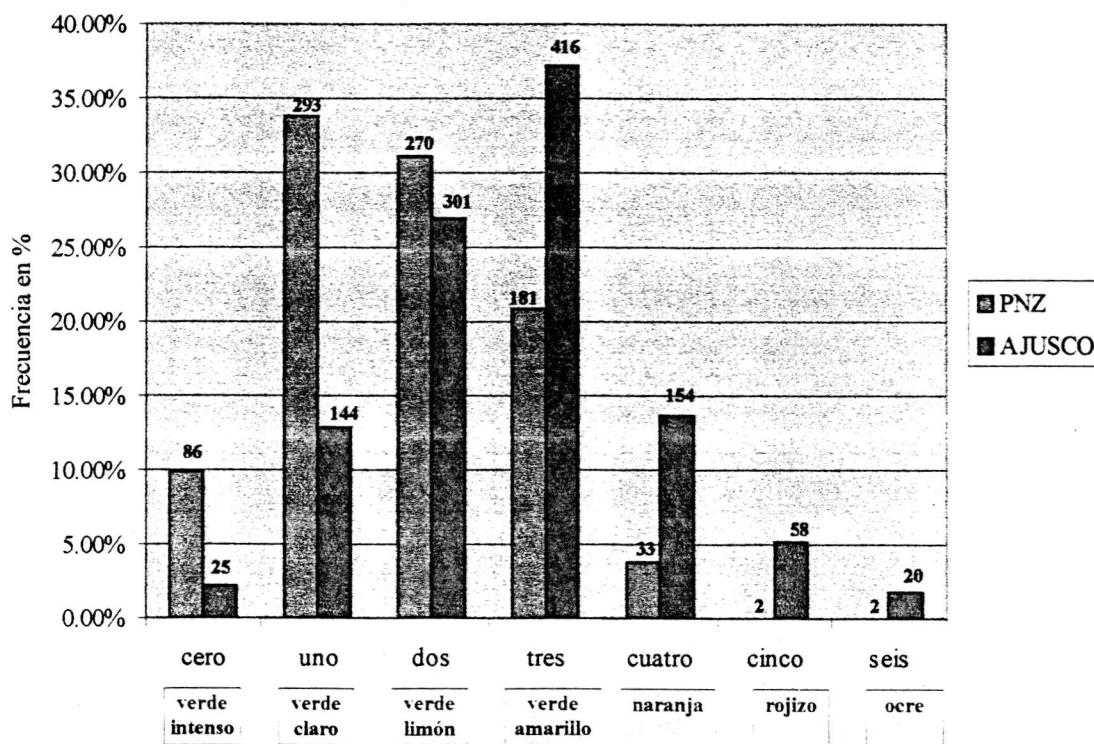


Figura 8. Frecuencia de observaciones del color del follaje en cada área de estudio. El nombre descriptivo de cada categoría de color (cero a seis) aparece en recuadros.

5.2.1.2. Retención de follaje

La retención de acículas en Ajusco y Zoquiapan gráficamente se comportó de manera muy similar; presentando el grueso de las observaciones (cerca del 50% de los datos) en la clase uno: árboles con retención del 50% al 75% del follaje de la copa; menos del 10% de los datos se ubicaron en los extremos del histograma que corresponden a los individuos de excelente retención (clase cero) y a los de pésima retención (clase tres). En la **figura 9** se muestran estos resultados.

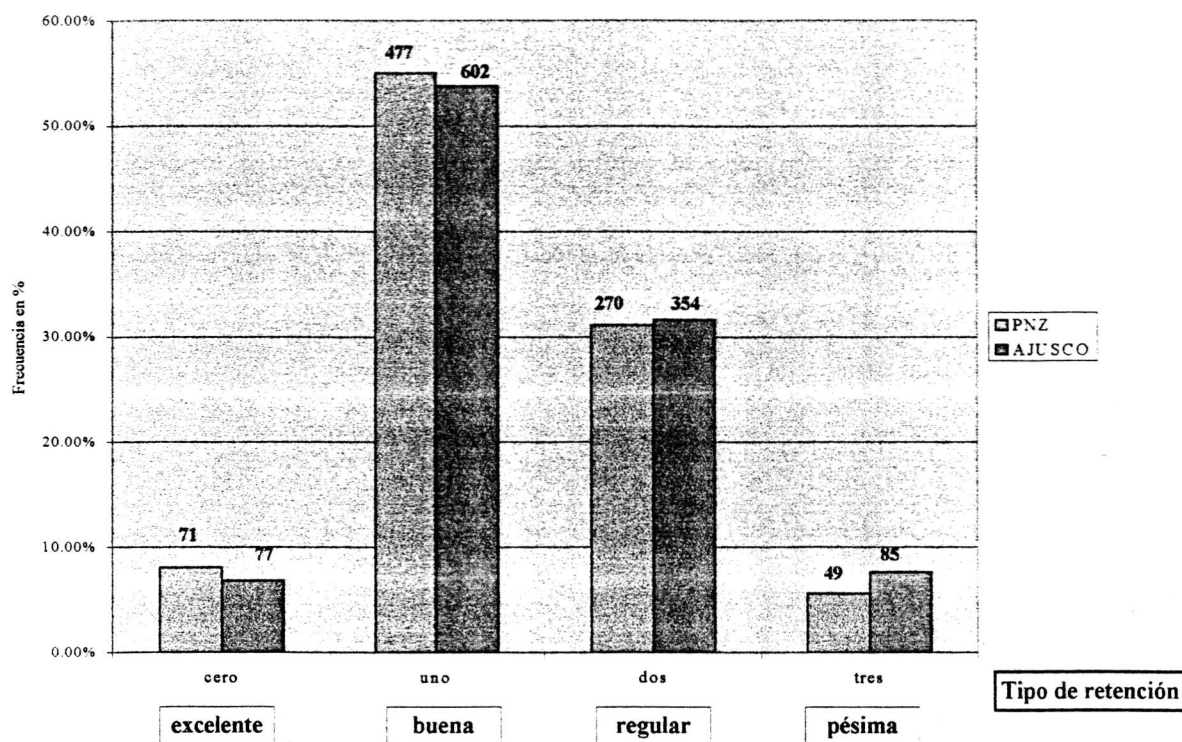


Figura 9. Retención de acículas por localidad.

En ambas localidades la mayor parte de los árboles de la muestra tuvieron una buena transparencia de copa conservando de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ del follaje. Las copas más ralas (clase tres) fueron más frecuentes en Ajusco, mientras que las más tupidas (clase cero) se presentaron casi con igual frecuencia en los dos sitios.

5.2.1.3 Condición de la punta

Como en el caso anterior la tendencia de las dos muestras fue similar, presentándose la mayoría de las observaciones en la clase cero (punta con crecimiento). En Ajsco la proporción de individuos con esta característica fue del 60.9% mientras que en Zoquiapan fue 74.5%, lo que reflejó un mejor estado de vigor de los árboles y cualitativamente un mayor crecimiento en esta localidad. En el siguiente gráfico se ilustran las frecuencias de ambos sitios.

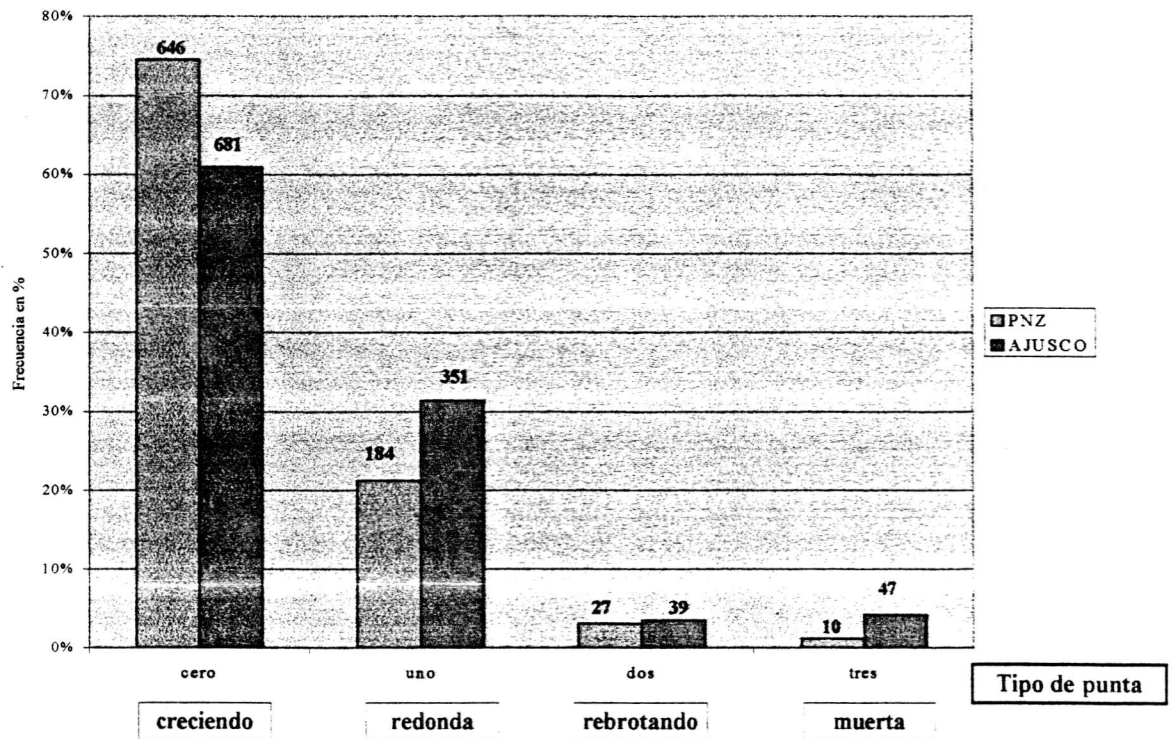


Figura 10. Estado de la punta en las dos localidades.

Se observó que los árboles muertos fueron menos frecuentes en Zoquiapan que en Ajusco, que además tuvo un mayor número de árboles con lesiones de la punta (clases uno y dos) que se manifiestan en una reducción del crecimiento del árbol.

5.2.1.4. Daño en el follaje

Esta variable presentó el mayor número de datos dentro de las clases uno a cuatro, y registró pocas observaciones en las restantes categorías (**figura 11**).

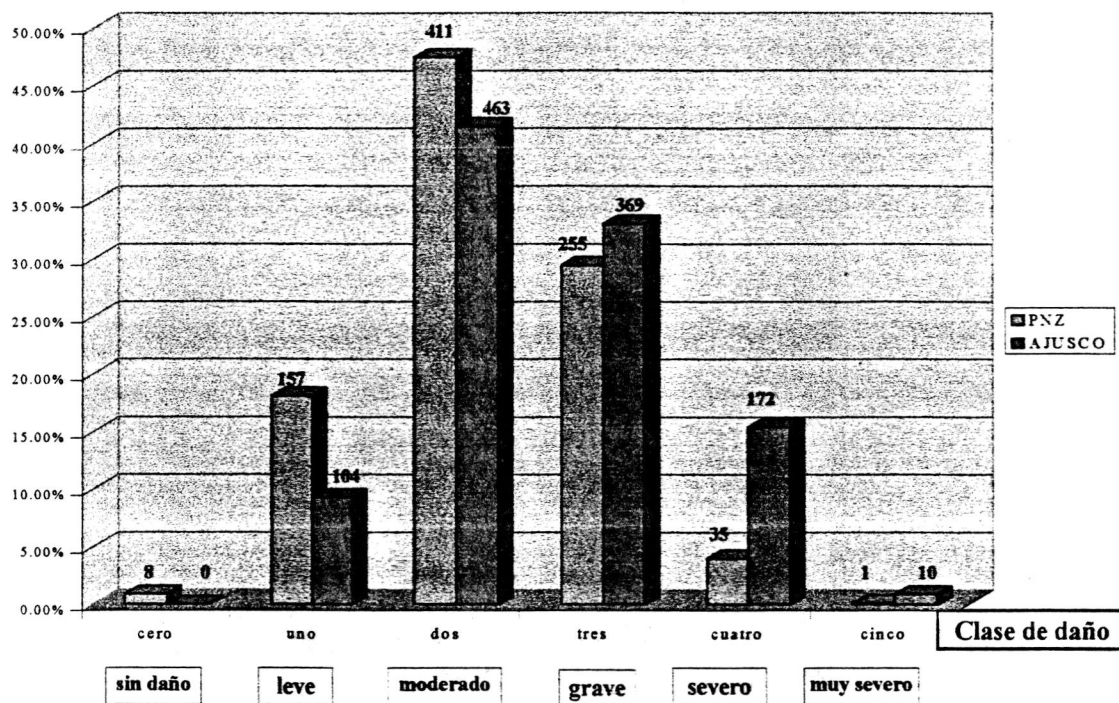


Figura 11. Lesiones en la acícula.

Los árboles en Ajusco presentaron con más frecuencia hojas dañadas que en Zoquiapan, esto implica un mayor porcentaje de manchados cloróticos sobre la superficie de la acícula que tiende a caer prematuramente. Este daño puede estar asociado a la longitud de la hoja y a su retención así como al color de la copa; en el caso de Ajusco, la primer variable obtuvo un valor promedio menor que en Zoquiapan lo que podría confirmar el supuesto de que existe alguna relación entre ellas, para lo cual se requiere efectuar un análisis que compruebe esta asociación.

Las frecuencias estimadas en porcentaje para las variables descritas en los párrafos anteriores se presentan en los cuadros 15 y 16.

CUADRO 15. Frecuencia en porcentaje de las variables seleccionadas por SCREEN en Zoquiapan.

ANALISIS DE FRECUENCIAS EN PORCENTAJE					
Localidad: Zoquiapan					
CLASE	VARIABLES				
	COLOR %	HOJA %	PUNTA %	DAÑO %	GRADO %
cero	9.9	8.1	74.5	0.9	80.3
uno	33.8	55.0	21.2	18.1	15.5
dos	31.14	31.1	3.1	47.4	4.3
tres	20.8	5.6	1.2	29.4	-
cuatro	3.8	-	-	4.0	-
cinco	0.02	-	-	0.1	-
seis	0.02	-	-	-	-

CUADRO 16. Frecuencia en porcentaje de las variables seleccionadas en Ajusco.

ANALISIS DE FRECUENCIAS EN PORCENTAJE					
Localidad: Ajusco					
CLASE	VARIABLES				
	COLOR %	HOJA %	PUNTA %	DAÑO %	GRADO %
cero	2.2	6.8	60.9	0.0	39.9
uno	12.8	53.8	31.4	9.3	45.6
dos	26.9	31.6	3.5	41.4	14.5
tres	37.2	7.6	4.2	33.0	-
cuatro	13.7	-	-	15.4	-
cinco	5.2	-	-	0.9	-
seis	1.8	-	-	-	-

5.2.2. Variables Paramétricas

Después de reparametrizar los datos cuantitativos se estimaron las frecuencias de **altura, diámetro y longitud de follaje** por cada clase discreta. En los cuadros 17 y 18 se resume esta información.

CUADRO 17. Resultados del análisis de frecuencia de las variables paramétricas. Zoquiapan, Edo. de Méx.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS			
Localidad: Zoquiapan			
CLASE	VARIABLES		
	ALTURA	DIÁMETRO	LONGITUD
cero	2	97	4
uno	294	334	35
dos	136	214	268
tres	84	158	382
cuatro	88	46	153
cinco	95	11	23
seis	102	3	1
siete	63	1	1

CUADRO 18. Resultados del análisis de frecuencia de las variables paramétricas. Ajusco, D.F.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS			
Localidad: Ajusco			
CLASE	VARIABLES		
	ALTURA	DIÁMETRO	LONGITUD
cero	22	114	-
uno	501	531	-
dos	417	259	8
tres	136	144	120
cuatro	30	54	629
cinco	8	-	345
seis	2	-	16
siete	-	-	-

Las frecuencias de las dos localidades se compararon entre sí por variable distribuyendo la información en una sola gráfica. En las figuras se agruparon los datos por frecuencia de observaciones por clase discreta, bajo de las barras de cada histograma aparece una serie de “cajitas” donde se indica la reparametrización de las variables continuas a valores discretos señalando el intervalo numérico que abarcó cada categoría.

5.2.2.1. Altura

En Ajusco se registró un mayor número de observaciones en las categorías de altura uno y dos (**figura 12**), lo que implicó un mayor número de árboles de talla pequeña con pocos individuos de porte más alto. En Zoquiapan la altura tuvo más variabilidad y careció de un patrón definido, dicha variabilidad se atribuyó a que los datos se tomaron de árboles juveniles en diferentes etapas de crecimiento.

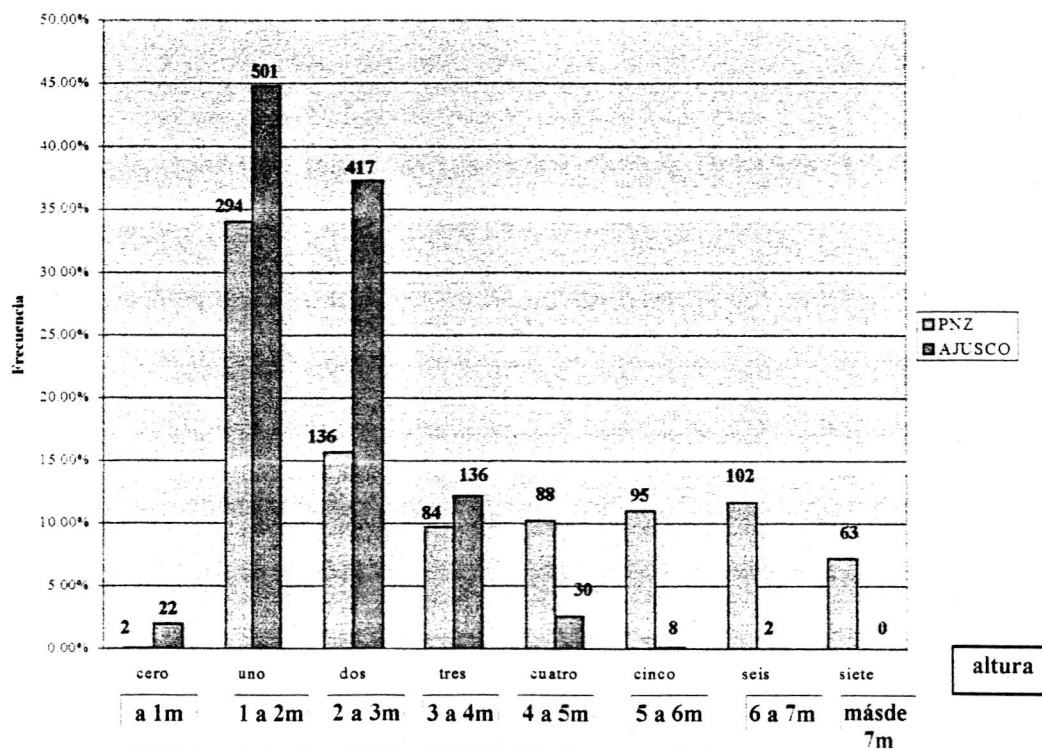


Figura 12. Clases de altura en cada localidad (medida en metros).

5.2.2.2. Diámetro

En las dos áreas de estudio el diámetro normal predominante fue de la clase uno (de 3.1 a 6 cm), con muy pocas observaciones en las clases cinco a siete que representan a los árboles con fuste por arriba de los 15 cm de diámetro. También se observó que cerca del 80% de los datos de la muestra se distribuyeron entre las clases uno a tres con rangos que abarcan de 3 a 12 cm de diámetro (**figura 13**).

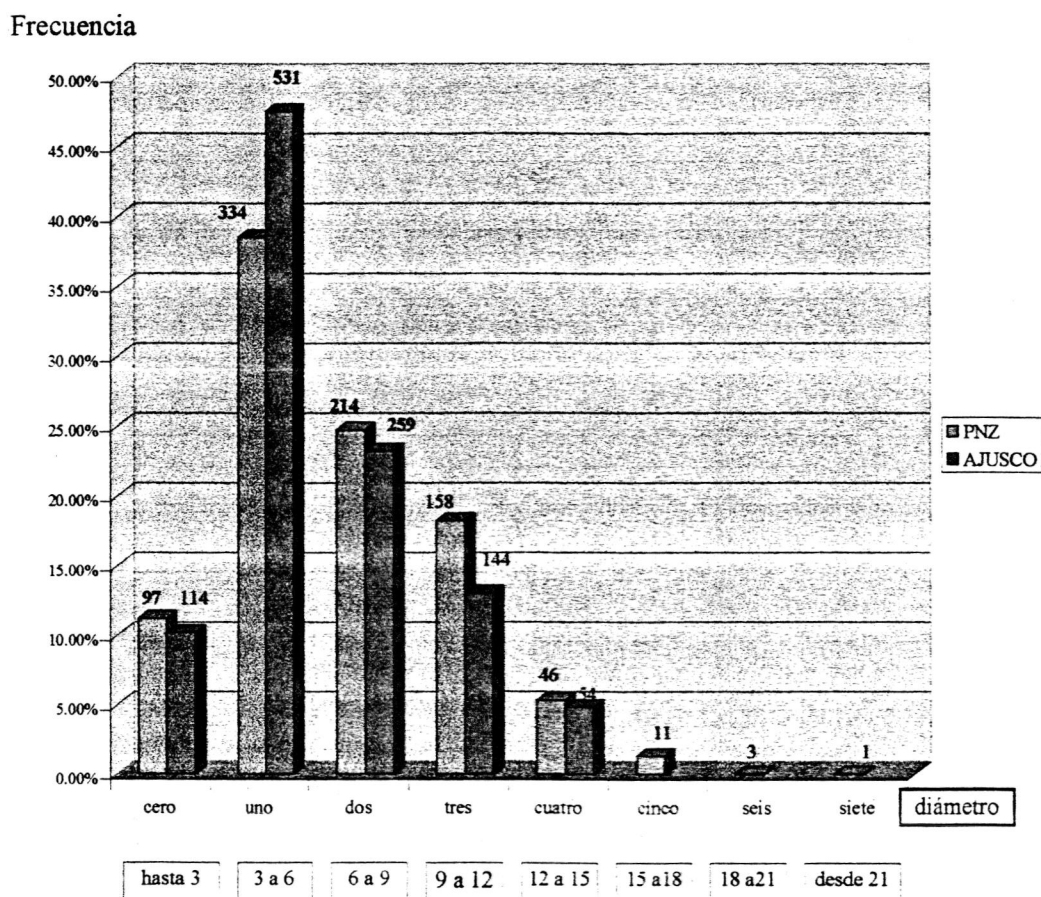


Figura 13. Diámetro normal de los árboles de la muestra (medido en cm).

5.2.2.3. Altura y diámetro

Finalmente se combinó en una sola gráfica las frecuencias de altura y diámetro de cada área de estudio. En ambos sitios fueron más frecuentes los árboles con diámetro y talla pequeña ubicados en las clases uno y dos: árboles con diámetro normal de 3 a 6 cm y altura de 1 a 2 m; y árboles con diámetro normal de 6 a 9 cm y altura de 2 a 3 m. En Ajusco se registraron pocos árboles en las clases cinco y seis que representan a individuos con diámetro mayor a 18 cm y altura superior a 6 m (figura 14); en Zoquiapan se presentó un mayor número de árboles con altura por arriba de los 5m, sin embargo se obtuvieron pocos registros en las categorías de diámetro superior a 18 cm (figura 15).

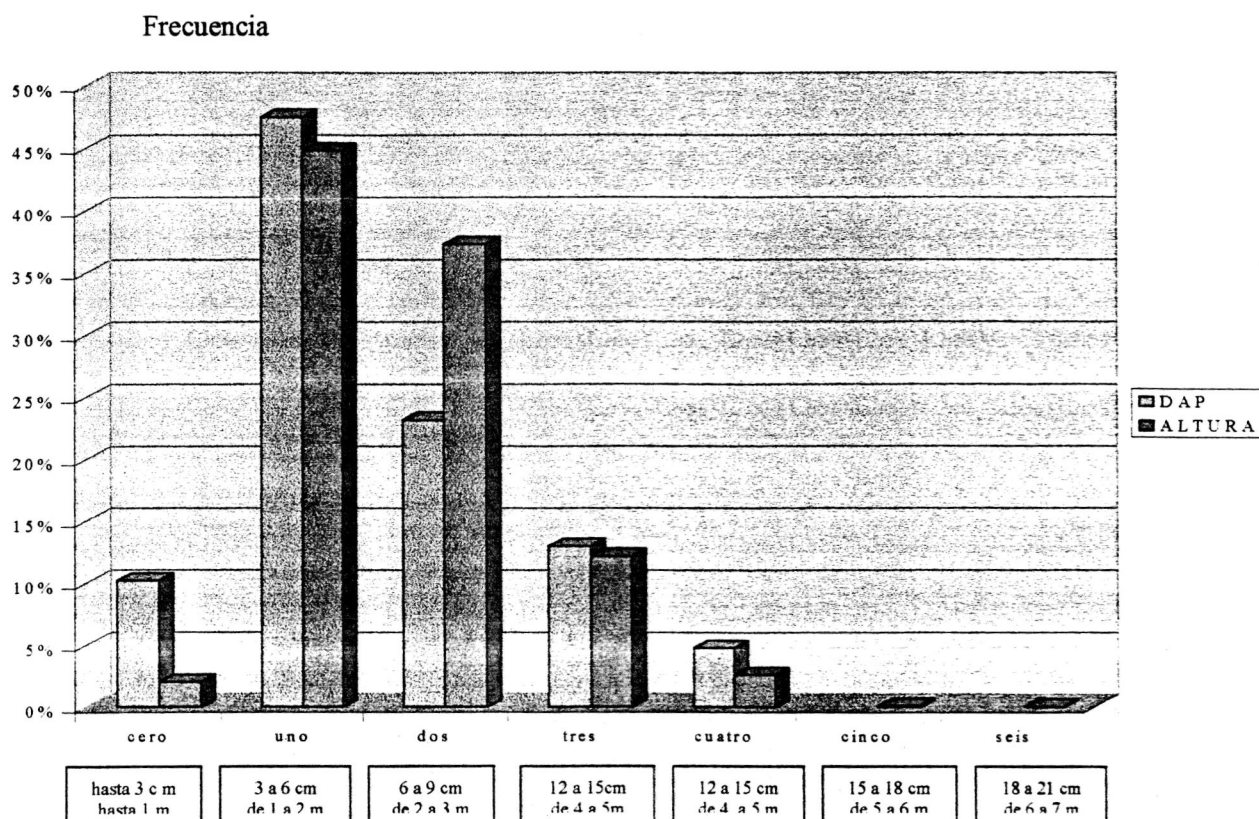


Figura 14. Diámetro y altura del arbolado en Ajusco (los números dentro de las cajitas indican el intervalo del diámetro y altura correspondiente a cada categoría).

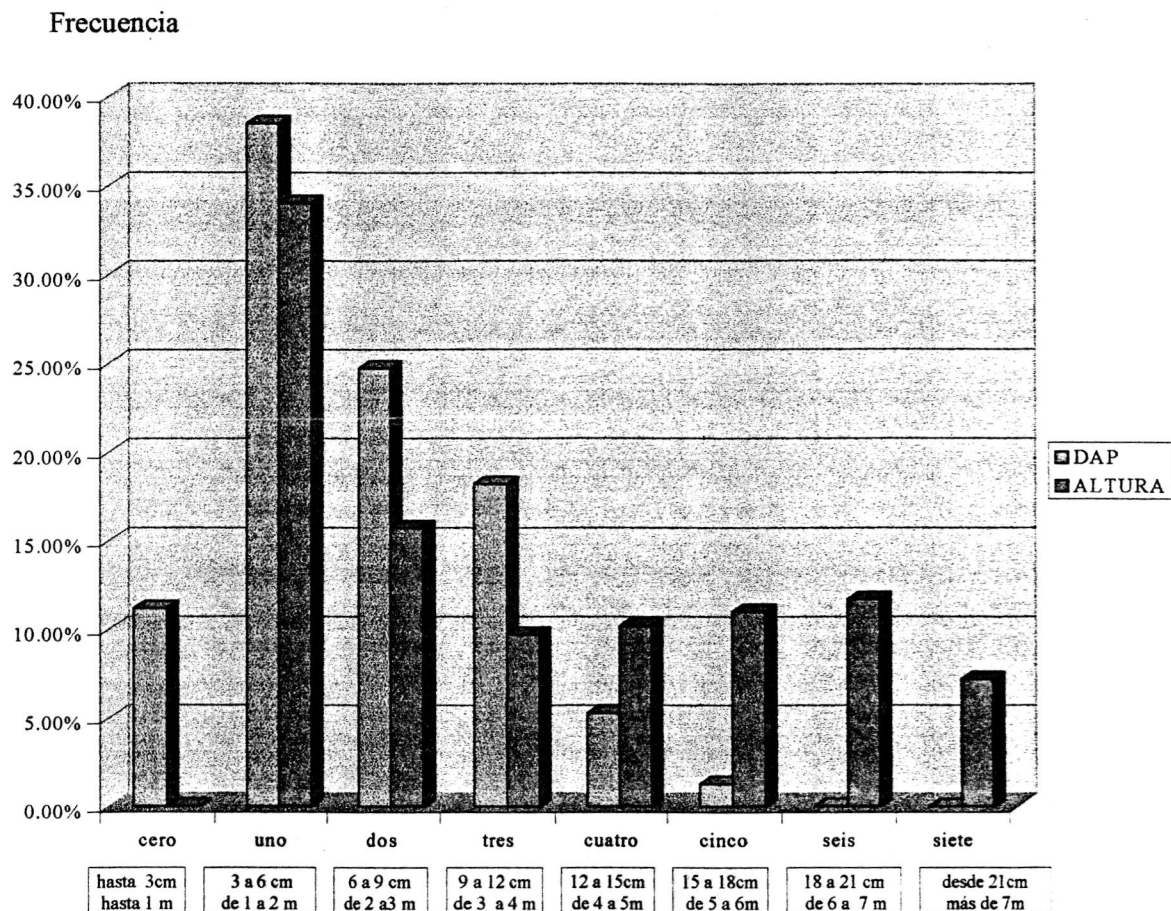


Figura 15. Diámetro y altura del arbolado en Zoquiapan.

5.2.2.4. Longitud del follaje

La longitud promedio de las acículas fue menor en Ajusco que obtuvo un valor de 10.28 cm respecto a Zoquiapan que reportó 14.52cm de largo. En la primera localidad el 56.3% de los árboles se mantuvo en la categoría de follaje 4 (hojas de 9 a 12 cm de largo) y el 31% en la de tipo 5 (de 6 a 9 cm); en Zoquiapan el 44% estuvo en la clase tres (acículas entre 12 y 15 cm) y el 31% en la clase dos (acículas entre 15 y 18cm).

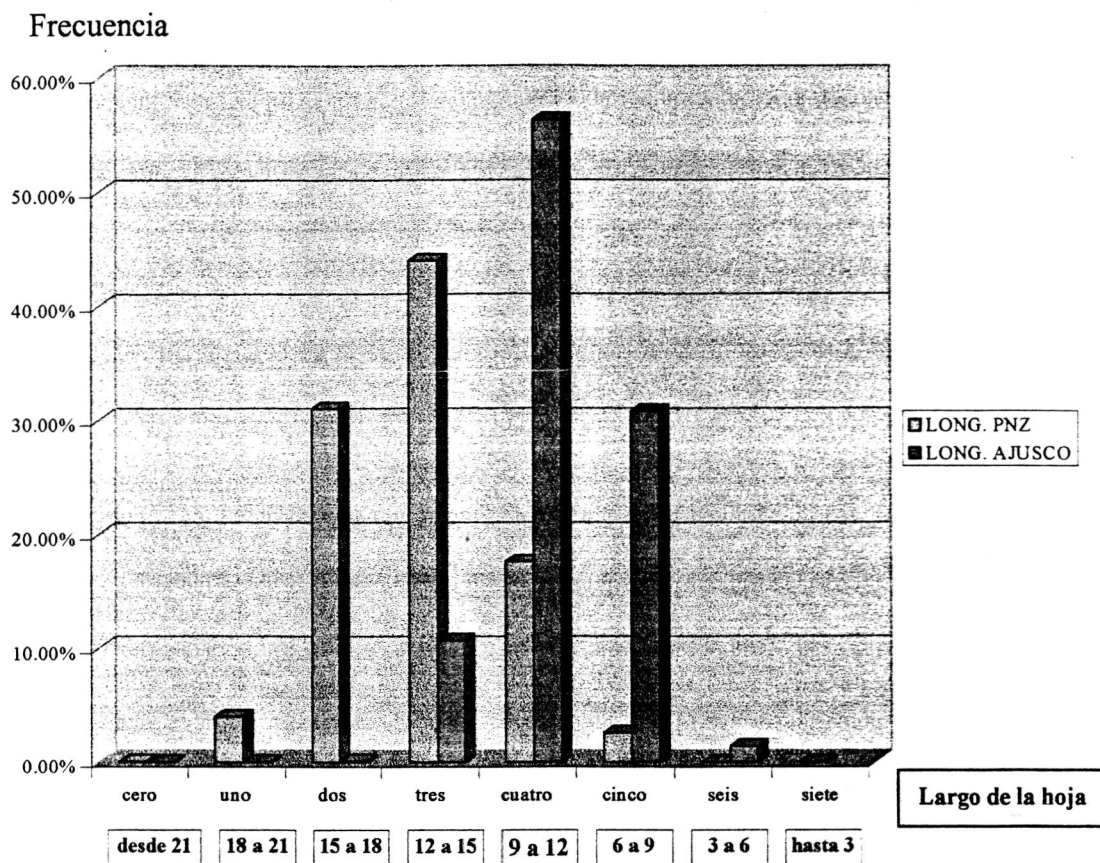


Figura 16. Longitud promedio de las acículas (medidas en cm).

En los dos sitios las hojas de 3cm de longitud fueron poco frecuentes, correspondiendo principalmente a árboles pequeños en crecimiento o bien a individuos con retención de follaje del tipo 3 (hojas en menos del 25% de la copa) que habían perdido casi la totalidad de sus hojas; excepcionalmente se colectaron en árboles con retención de follaje de la clase dos (hojas en menos del 50% de la copa). En los árboles con excelente o buena retención de follaje las acículas en general estaban en mejor estado fitosanitario.

Al final de este análisis se estimaron las frecuencias en porcentaje de cada área de estudio; los resultados aparecen en los cuadros 19 y 20.

CUADRO 19. Resultado del análisis de frecuencias de las variables paramétricas expresado en porcentaje. Zoquiapan, Edo. de Méx.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS EN PORCENTAJE			
Localidad: Zoquiapan			
CLASE	VARIABLES		
	ALTURA %	DIÁMETRO %	LONGITUD %
cero	0.02	11.2	0.04
uno	34.0	38.5	4.0
dos	15.7	24.7	31.0
tres	9.7	18.2	44.0
cuatro	10.2	5.3	17.6
cinco	11.0	1.3	2.6
seis	11.7	0.03	0.01
siete	7.2	0.01	0.01

CUADRO 20. Resultado del análisis de frecuencias de las variables paramétricas expresado en porcentaje. Ajusco, D.F.

ANÁLISIS DE FRECUENCIAS EN PORCENTAJE			
Localidad: Ajusco			
CLASE	VARIABLES		
	ALTURA %	DIÁMETRO %	LONGITUD %
cero	2	10.2	-
uno	44.8	47.5	-
dos	37.3	23.2	0.07
tres	12.2	13.0	10.7
cuatro	2.6	4.8	56.3
cinco	0.07	-	30.8
seis	0.01	-	1.4
siete	-	-	-

5.3. Comparaciones no paramétricas

Las variables **hoja, punta, color, daño, muerde y grado** se sometieron a una comparación utilizando las pruebas de Kruskall-Wallis y la de Wilcoxon que se incluyen dentro del procedimiento no paramétrico **Npar1way** de SAS.

Esta comparación se efectuó en dos niveles, el primero fue entre los rodales de cada área de estudio utilizando la prueba de **Kruskall-Wallis** para más de dos muestras independientes, para lo que se asumió que existe independencia entre las observaciones de las diez muestras extraídas por localidad. Esta prueba es aplicable a κ muestras aleatorias independientes de diferente tamaño medidas en escala ordinal y es equivalente a la prueba de Wilcoxon-Man-Whitney para más de dos muestras (Steel R.G. y J.H. Torrie 1981; Ramírez G.M. y Q. López 1993; Siegel S. 1986); para ello se asume que las muestras provienen de la misma población o de poblaciones idénticas que pueden diferir localmente respecto a sus promedios; en ambos casos supone una distribución continua de la variable bajo estudio.

El segundo nivel correspondió a un análisis entre localidades; en este caso las observaciones fueron comparadas utilizando la prueba de **Wilcoxon** que permite detectar las diferencias reales y su magnitud entre las dos muestras contrastadas proporcionando la diferencia entre las dos medias independientes (Johnson R., 1991).

5.3.1. La Prueba de Kruskall-Wallis

Las N observaciones independientes de todas las muestras son reemplazadas por rangos combinados en una sola serie ordenada que inicia con el rango 1, que reemplaza al puntaje más pequeño de los datos, hasta N que es el rango más grande posible correspondiente al puntaje más alto de las observaciones en las κ muestras. El estadístico de prueba que se usa es:

$$T^0 = \left[\frac{12}{N(N+1)} \right] \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Donde n_j es el número de observaciones de la i -ésima muestra desde $i=1 \dots \kappa$, R_i es la suma de rangos de la j -ésima muestra y $N = \sum n_i$ es el número total de observaciones, en este caso la varianza se define como:

$$S^2 = \frac{N(N+1)}{12}$$

O en forma equivalente;

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{rangos} R(X_{ij})^2 - N \frac{(N+1)^2}{4} \right)$$

$$T^0 = \frac{1}{S^2} \left(\sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - \frac{N(N+1)^2}{4} \right)$$

Existe una corrección de T^0 en el caso en que se registran empates en las observaciones; esta corrección no modifica al estadístico considerablemente:

$$\text{Corrección} = 1 - \frac{\sum H}{(n-1)n(n+1)}$$

Donde $H = t^3 - t$ para cada grupo de empates y t es el número de observaciones empatadas por grupo. El efecto de los empates se corrige al dividir entre esta cantidad, el resultado es la **H corregida**. La corrección de los empates incrementa el valor del estadístico haciéndolo más significativo al reducir la posibilidad de rechazar erróneamente a H_0 .

En los dos casos anteriores la hipótesis de nulidad establece que no existe diferencia en el efecto de los tratamientos sobre la muestra. El criterio de decisión señala que si el estadístico **H** es igual o mayor que el proporcionado por la tabla, a un nivel de significancia establecido con anterioridad, para $g! = \kappa - 1$, se rechaza H_0 y se acepta la hipótesis alternativa al nivel de significación señalado. La variable **T** se distribuye como ji-cuadrada con $k-1$ grados de libertad para tamaños muestrales grandes.

En el caso de que la hipótesis nula sea rechazada y solamente en este caso (Conover W.J. 1971) se usa un procedimiento complementario para determinar cuales poblaciones son estadísticamente diferentes, en este caso, sí se cumple la siguiente desigualdad, entonces se establece las poblaciones que son significativamente diferentes:

$$\left| \frac{R_i}{n_i} - \frac{R_j}{n_j} \right| > t_{1-(\alpha/2)} \left(S^2 \frac{N-1-T^0}{N-k} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)^{1/2}$$

Donde R_i y R_j son las sumas de rangos de las dos muestras; $t_{1-\alpha/2}$ es el $(1-\alpha/2)$ cuantil de la distribución t con $N-k$ grados de libertad; en este caso la desviación estandar S^2 y el estadístico de prueba T son los descritos en párrafos anteriores.

5.3.1.1. Comparación entre rodales de la misma localidad

Prueba De Kruskal-Wallis

Bajo la hipótesis anterior se realizó la prueba de Kruskal-Wallis para más de 2 muestras independientes, donde:

κ = número de condiciones o tratamientos

$\chi^2_{\alpha, \kappa-1}$ = de tablas

En este caso se tuvieron:

$\kappa = 10$ rodales y $\chi^2_{0.95,9} = 16.9091$

Regla de decisión: rechazar H_0 si $T^0 \geq \chi^2_t$

La prueba anterior se aplicó en Zoquiapan donde se realizó una comparación entre rodales para las variables: **hoja, punta, color, daño, muerde y grado**; utilizando

el siguiente juego de hipótesis aplicable a todas las variables que se sometieron a la comparación:

ZOQUIAPAN:

Ho: El (color) es el mismo en todos los rodales

vs Ha: en al menos uno de los rodales el (color) es diferente

Utilizando la prueba de Kruskal-Wallis incluida en el procedimiento PROC NPAR1WAY de SAS se obtuvo el estadístico de decisión T° para cada variable analizada; el valor de dicho estadístico, así como el nivel de significancia¹ ($\hat{\alpha}$), aparecen en el siguiente cuadro:

CUADRO 21. Resultado del análisis no paramétrico aplicado a las variables seleccionadas por SCREEN. Zoquiapan, Edo. de Méx.

PRUEBA KRUSKAL-WALLIS Comparación Entre Rodales Localidad: Zoquiapan			
PARAMETRO	$\hat{\alpha}$	ESTADÍSTICO T°	DECISIÓN
hoja	0.0001	149.11	rechazar Ho
punta	0.0001	142.29	rechazar Ho
color	0.0001	158.85	rechazar Ho
daño	0.0001	82.76	rechazar Ho
muerde	0.0001	116.70	rechazar Ho
grado	0.0001	188.41	rechazar Ho

El mismo procedimiento se aplicó con los rodales del Ajusco comparando las variables **hoja, punta, color y grado**; los resultados de esta prueba se muestran en seguida:

¹ El $\hat{\alpha}$ (nivel de significancia muestral) se define como $\hat{\alpha}$ = Probabilidad (rechazar Ho| Ho es cierta)

CUADRO 22. Resultado del análisis no paramétrico aplicado a las variables seleccionadas por SCREEN. Ajusco, D.F.

PRUEBA KRUSKAL-WALLIS Comparación Entre Rodales Localidad: Ajusco			
PARAMETRO	α	ESTADÍSTICO T°	DECISIÓN
hoja	0.0042	24.041	rechazar Ho
punta	0.0001	50.628	rechazar Ho
color	0.0001	36.445	rechazar Ho
grado	0.0001	55.062	rechazar Ho

En todos los casos anteriores se rechazó la hipótesis nula de que los parámetros bajo análisis (retención de follaje, forma de la punta, color del follaje, daño en la acícula, infestación de muérdago y deformación del fuste) son iguales en cada rodal y se aceptó la hipótesis alternativa de que al menos uno de los rodales es diferente por lo que se asume que existen diferencias en el vigor de los árboles entre rodales; estas diferencias pueden ser debidas a las variaciones locales de cada sitio; para establecer cuáles de ellos diferían entre sí se realizó una comparación múltiple entre rodales que permitió compararlos por pares y determinar que rodales eran estadísticamente iguales en vigor; estos resultados se contrastaron con los datos ambientales, como la densidad de individuos, la proximidad entre sitios o la altitud, de cada par de rodales seleccionados. La densidad de árboles por rodal, así como la altitud en que se localizan los rodales de cada área de estudio, se muestran en el siguiente cuadro.

CUADRO 23. Número de individuos y ubicación altitudinal de los rodales en cada área de estudio

Densidad y altitud de los rodales por localidad (la altitud esta expresada en msnm)										
AJUSCO	RODAL									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Densidad	100	60	113	85	188	134	156	72	125	85
Altitud	3360	3360	3360	3360	3354	3354	3355	3350	3350	3350
Zoquiapan	RODAL									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Densidad	114	94	124	128	65	101	66	57	42	76
Altitud	3380	3380	3250	3250	3250	3270	3250	3340	3350	3350

5.3.1.2. Comparaciones múltiples

Al realizar las comparaciones múltiples entre pares de rodales se planteó el siguiente juego de hipótesis para cada variable bajo prueba (hoja, punta, muerde, grado y daño) para probar el supuesto:

Ho: El vigor (medido en color) de los árboles es igual en todos los rodales

Ha: En algunos de los rodales el vigor de los árboles es mayor que en otros

Utilizando la regla de decisión:

Rechazar Ho si:

$$\left| \frac{R_i}{n_i} - \frac{R_j}{n_j} \right| > t_{1-(\alpha/2)} \left(S^2 \frac{N-1-T^0}{N-k} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)^{1/2}$$

Para realizar el análisis se estimó la desviación estandar utilizando la tabla de ANOVA no paramétrica proporcionada por SAS; con la suma de rangos por rodal obtenida en la prueba de Kruskall-Wallis y el número de observaciones por rodal (n_i) se calculó el valor absoluto de la diferencia del rango promedio entre pares de rodales; este resultado se comparó con el resultado obtenido para el lado derecho de la desigualdad anterior. El procedimiento se repitió con cada una de las variables bajo comparación.

El valor de $t_{1-(\alpha/2)}$ en la tabla de distribución t para Zoquiapan y Ajusco fue de $t_{1-(0.05/2)} = 1.645$ para $\alpha=0.05$ y $N-k$ grados de libertad con $k=\text{número de rodales}$ y $N=\text{número de observaciones por localidad}$; en este caso correspondió a $(N-k) \rightarrow \infty$ grados de libertad.

CUADRO 24. Ejemplo del procedimiento de comparación múltiple entre rodales para una sola variable.

COMPARACIONES MÚLTIPLES ENTRE RODALES		
Localidad: Zoquiapan		
Variable: punta		
Comparación entre rodales	$\left \frac{R_i}{n_i} - \frac{R_j}{n_j} \right $	$(1.645) \left(S^2 \frac{N-1-T}{N-k} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)^{1/2}$
1 y 2	$\left \frac{62679}{100} - \frac{24072}{60} \right $	$(1.645) \left(S^2 \frac{866-T}{857} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{100} + \frac{1}{60} \right)^{1/2}$
1 y 3	$\left \frac{62679}{100} - \frac{68680}{113} \right $	$(1.645) \left(S^2 \frac{866-T}{857} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{100} + \frac{1}{113} \right)^{1/2}$
⋮	⋮	⋮
8 y 10	$\left \frac{45777}{72} - \frac{52274}{85} \right $	$(1.645) \left(S^2 \frac{866-T}{857} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{72} + \frac{1}{85} \right)^{1/2}$
9 y 10	$\left \frac{66588}{125} - \frac{52274}{85} \right $	$(1.645) \left(S^2 \frac{866-T}{857} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{125} + \frac{1}{85} \right)^{1/2}$

Por localidad, se realizaron en total 45 comparaciones entre rodales para cada variable seleccionada por SCREEN; en la mayoría de las comparaciones se rechazó el supuesto de igualdad de vigor entre rodales (para cada variable en análisis) excepto para aquellos pares de rodales en los que no se rechazó la hipótesis nula:

CUADRO 25. Rodales estadísticamente iguales (a un nivel del 95% de confianza) para las variables de vigor analizadas en cada localidad.

COMPARACIONES MÚLTIPLES NO SIGNIFICATIVAS		
Localidad	Variable	Rodales iguales
ZOQUIAPAN	Punta	2 y 10
	Daño	5 y 6
		6 y 10
	Grado	2 y 3
AJUSCO	Color	3 y 10

5.3.1.3. Comparación entre localidades

En el segundo nivel de comparación que se aplicó entre las dos áreas de estudio se contrastó el vigor de las dos muestras para las variables **hoja, punta, color, grado, muerte y daño** con el siguiente juego de hipótesis:

Ho: El (color) es igual en ambas localidades

vs Ha: El (color) es diferente en al menos una de ellas

Con la prueba de **U de Mann-Whitney** se comparó entre las dos muestras independientes (Ajusco y Zoquiapan) el valor del estadístico con el p -ésimo cuantil (W_p) de acuerdo al siguiente criterio de decisión:

Rechazar Ho si $|T^0| > W_p$ donde:

$$W_p = \frac{n(N+1)}{2} + \left(x_p \sqrt{\frac{n_1 n_2}{12} (N+1)} \right)$$

En este caso

$$W_p = \frac{867(1986)}{2} + (1.645) \sqrt{\frac{(867)(1118)(1986)}{12}}$$

$$W_p = 881766.08$$

con x_p = cuantil p de $\chi \sim n(0,1)$ que corresponde a $\chi_{(0.95)} = 1.645$

$N=1985$ total de observaciones

$n_{Ajusco}=1118$ y $n_{PNZ}=867$

En el siguiente cuadro se presentan los resultados de la comparación entre el vigor de ambas localidades.

CUADRO 26. Comparación entre el vigor de las localidades (a un nivel del 95% de confianza) para las variables seleccionadas por SCREEN.

Prueba U De Man-Whitney Comparacion Entre Localidades			
PARAMETRO	α	ESTADÍSTICO T^o	DECISIÓN
Hoja	0.1180	-1.56327	No rechazar Ho
Punta	0.0001	-6.47989	rechazar Ho
Color	0.0001	-17.1292	rechazar Ho
Grado	0.0001	-17.6872	rechazar Ho
Muerde	0.0001	15.1923	rechazar Ho
Daño	0.0001	-9.26416	rechazar Ho

El cuadro resume los resultados de esta prueba; en el se aprecia que en la mayoría de las corridas se rechaza la hipótesis nula de que no existe diferencia en el vigor del arbolado entre las dos localidades y se acepta la hipótesis alternativa de que las dos áreas de estudio presentan diferencias en la **condición de la punta, color de copa, infestación de muérdago, conformación del fuste y daño en el follaje** de los árboles muestreados.

Al final de esta prueba se concluyó que estadísticamente las dos áreas de estudio difieren entre sí en el vigor de la población de *Pinus hartwegii* respecto al estado de las variables mencionadas; para la variable **retención del follaje** no se encontró que existiera diferencia significativa entre ambas localidades.

5.4. Comparaciones Paramétricas

Para estudiar el efecto de las dos localidades sobre las variables de interés, **altura, diámetro normal y longitud de follaje**, se realizó un **análisis de varianza paramétrico**. Similarmente, para conocer el efecto de los diversos rodales sobre las tres variables anteriores se efectuó otro ANDEVA paramétrico. Los análisis se realizaron mediante el procedimiento **PROC GLM** de SAS.

5.4.1. La prueba de Tukey

Puesto que no había comparaciones planeadas de antemano, se utilizó la prueba de **Tukey** para efectuar las comparaciones múltiples entre pares de medias. Esta prueba consiste en la comparación múltiple de varias medias para lo cual se construyen intervalos de confianza simultáneos al $100(1-\alpha)\%$ para todos los pares de comparaciones; este procedimiento esta basado en la distribución del rango estudentizado (Walpole R.E. y R.H. Myers 1993; Steel R.G. y J.H. Torrie 1981; Montgomery D.C. 1991). Para realizar las comparaciones entre pares de medias se requiere un valor contra el cual se comparan las diferencias entre pares de medias. Este valor se calcula como:

$$(q_{\alpha, f}^p)(S_{ij})$$

Donde $q_{\alpha, f}^p$ = Valor de tablas del rango estudentizado, para p medias, con f grados de libertad del error y nivel de significancia α y S_{ij} = Error estándar de la diferencia entre las medias i y j .

Esta función se aplica a todas las diferencias entre pares de medias, así el método consiste en encontrar todas las diferencias significativas entre las medias i y j ($i \neq j$) de acuerdo a la desigualdad:

$$(\bar{y}_i - \bar{y}_j) > (q_{\alpha, f}^p)(S_{ij})$$

En general:

$$S_{ij} = \sqrt{CM(\text{error}) \left(\frac{1}{r_i} + \frac{1}{r_j} \right)}$$

Donde r_i = Número de repeticiones del tratamiento i

r_j = Número de repeticiones del tratamiento j

$CM(\text{error})$ = Cuadrado medio del error en la tabla de ANDEVA respectiva

Con el valor crítico se pueden construir intervalos de confianza para las diferencias entre pares de medias. Estos intervalos tienen la forma:

$$I.C.(\mu_i - \mu_{i'}) = (Y_{i.} - Y_{i'.}) \pm (q_{\alpha, f}^p)(S_{ij})$$

Estos intervalos de confianza son simultáneos, y se aplican a todas las posibles diferencias entre medias μ_i y $\mu_{i'}$.

En las expresiones anteriores:

$$Y_{i.} = \frac{1}{r_i} \sum_{j=1}^{r_i} Y_{ij}$$

Promedio del tratamiento i

$$Y_{i'.} = \frac{1}{r_{i'}} \sum_{j=1}^{r_{i'}} Y_{i'j}$$

Promedio del tratamiento i'
 $i \neq i'$

$$\mu = E(Y_{ij}) = \mu + \tau_i$$

Valor medio de la característica de interés cuando se tiene el efecto del tratamiento i

$$\mu_{i'} = E(Y_{i'j}) = \mu + \tau_{i'}$$

Idem., pero para el tratamiento i'

5.4.2. Análisis dasométricos

En ambas localidades se obtuvo el promedio de la altura, el diámetro normal y la longitud del follaje de toda la muestra; así como sus respectivas desviaciones estandar con el procedimiento **PROC GLM** de SAS. Respecto a la longitud de follaje, el largo de las acículas fue mayor en promedio en Zoquiapan que en el Ajusco; mientras que el diámetro fue similar en ambos sitios; finalmente la media de la altura fue ligeramente más alta en promedio en los árboles de Zoquiapan que en los del Ajusco. Estos resultados se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 27. Resultado del análisis de medias para las variables: altura, diámetro normal y longitud de follaje, en ambas localidades

PROMEDIO DE LAS VARIABLES DASOMÉTRICAS				
LOCALIDAD	ZOQUIAPAN		AJUSCO	
Variable	Media	Desviación	Media	Desviación
LONG (cm)	14.519377	2.5306469	10.275456	1.8651245
DAP (cm)	6.8289504	3.6088266	6.297942	3.2951370
ALT (m)	3.7439216	2.1794884	2.247665	0.9095723

5.4.3. Comparación entre rodales de la misma localidad

En esta sección se planteó la hipótesis nula de que **no existe diferencia en los valores medios de altura (diámetro normal o longitud de follaje) entre los rodales de la misma localidad**, para este propósito se consideró el modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

En el cual

Y_{ij} = variable de respuesta observada en el árbol j del rodal i

μ = media verdadera de la variable de respuesta

τ_i = efecto del rodal i sobre la variable de respuesta

ε_{ij} = término del error

Se asume que $\varepsilon_{ij} \sim \text{niid}(0, \sigma^2)$, es decir los errores tienen media cero, son independientes y todos con la misma varianza.

La hipótesis planteada fue:

Zoquiapan o Ajusco:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_9 = \mu_{10} \text{ vs.}$$

H_a : al menos un μ_i es diferente de los demás

La regla de decisión fue:

Rechazar H_0 con un nivel α , si $F_c > F_t$

Donde F_c es el valor del estadístico F de la tabla de ANDEVA correspondiente al modelo. F_t es el valor de la distribución F con parámetros q y ν , ν = *grados de libertad del error*, y con nivel α .

Para probar la hipótesis nula de que no existe diferencia en el valor medio de la altura (diámetro o longitud del follaje) entre rodales en cada sitio se aplicó el procedimiento de Tukey descrito anteriormente, utilizando **Proc glm** de SAS para efectuar la prueba.

Para cada una de las variables analizadas, en ambas áreas de estudio, se rechazó la hipótesis nula de igualdad de medias a un nivel de confianza del **95%** ($\alpha=0.05$), aceptándose la hipótesis alternativa de que al menos uno de los rodales es diferente en el valor medio de la altura, el diámetro normal y la longitud del follaje. El cuadro siguiente contiene los resultados del ANDEVA para las variables de interés.

CUADRO 28. Resultado del análisis de varianza para las variables de interés: altura, diámetro normal y longitud de follaje

RESÚMEN DE LOS NIVELES DE SIGNIFICANCIA MUESTRALES Y DECISIONES TOMADAS PARA LOS ANDEVAS DE LAS 3 VARIABLES Localidad: Zoquiapan			
Variable	Estadístico F_c	α	Decisión
DAP	18.25	0.0001	rechazar Ho
ALT	30.55	0.0001	rechazar Ho
LONG	25.12	0.0001	rechazar Ho

Con el rango estudentizado de Tukey se decidió cuáles pares de rodales eran significativamente diferentes; este procedimiento se efectuó para las tres variables analizadas en cada sitio. Los resultados se presentan en una matriz de 11x11 en la cual la primer columna de la izquierda y la primer fila representan el número de rodal; los rodales están ordenados de acuerdo a la salida proporcionada por SAS, los 3 asteriscos dentro de cada casilla representan los pares de rodales que son estadísticamente diferentes, con respecto al valor de la varianza indicada.

CUADRO 29. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para la altura. Zoquiapan, Edo. de Méx.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Zoquiapan Variable: altura										
rodales	1	5	8	6	7	9	4	3	10	2
2	***	***	***	***	***	***	***	***		
10	***	***	***	***	***					
3	***									
4	***									
9	***									
7	***									
6	***									
8	***									
5	***									
1										

CUADRO 30. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el diámetro. Zoquiapan, Edo. de Méx.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Zoquiapan Variable: diámetro										
rodal	1	5	6	7	3	10	8	4	9	2
2	***	***	***	***	***					
9	***									
4	***	***								
8	***									
10	***									
3	***									
7	***									
6	***									
5	***									
1										

CUADRO 30. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el largo de la hoja. Zoquiapan, Edo. de Méx.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Zoquiapan Variable: longitud del follaje										
rodal	9	10	8	5	2	6	4	7	1	3
3	***	***	***	***	***	***				
1	***	***	***	***	***	***				
7	***	***	***	***						
4	***	***	***	***						
6	***	***	***							
2	***	***	***							
5										
8										
10										
9										

Para la localidad del Ajusco se procedió de manera similar. Es decirse efectuó un ANDEVA para las tres variables, considerando como tratamiento a los rodales. El modelo estadístico es el mismo que el usado para el Parque Zoquiapan. Los resultados se muestran en el cuadro.

CUADRO 32. Resultado del análisis de varianza para las variables de interés: altura, diámetro normal y longitud de follaje

RESÚMEN DE LOS NIVELES DE SIGNIFICANCIA MUESTRALES Y DECISIONES TOMADAS PARA LOS ANDEVAS DE LAS 3 VARIABLES Localidad: Ajusco			
Variable	Estadístico F_c	α	Decisión
DAP	30.88	0.0001	rechazar Ho
ALT	16.05	0.0001	rechazar Ho
LONG	5.40	0.0001	rechazar Ho

Puesto que hubo diferencias entre los efectos de tratamientos, también se aplicó la prueba de Tukey.

CUADRO 33. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para la altura. Ajusco, D.F.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Ajusco Variable: altura										
rodales	5	1	6	7	3	4	10	8	2	9
9	***	***	***	***	***	***	***	***		
2	***	***	***	***						
8	***	***	***	***						
10	***	***	***							
4	***									
3										
7										
6										
1										
5										

CUADRO 34. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el diámetro. Ajusco, D.F.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Ajusco Variable: diámetro										
rodal	5	1	6	7	3	4	8	10	9	2
2	***	***	***	***	***	***	***	***		
9	***	***	***	***	***	***				
10	***	***	***	***						
8	***	***	***	***						
4	***									
3	***									
7	***									
6	***									
1	***									
5										

CUADRO 35. Matriz de resultados de la prueba de Tukey para el largo de la hoja. Ajusco, D.F.

RODALES SIGNIFICATIVAMENTE DIFERENTES Localidad: Ajusco Variable: longitud de follaje										
rodal	3	8	5	9	6	7	2	4	1	10
10	***	***	***	***	***	***	***	***		
1	***									
4										
2										
7										
6										
9										
5										
8										
3										

5.4.4. Comparación entre localidades

Al plantear el supuesto de que no existe diferencia en el diámetro normal, la longitud del follaje o la altura del arbolado entre localidades, se propuso el modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

Donde

Y_{ij} = variable de respuesta observada en el árbol j de la localidad i

μ = media verdadera de la variable de respuesta

τ_i = efecto de la localidad i sobre la variable de respuesta

ε_{ij} = término del error

En este caso, también se asume que los errores tienen media cero, son independientes y presentan la misma varianza, $\varepsilon_{ij} \sim \text{niid}(0, \sigma^2)$.

Este análisis se efectuó de acuerdo al juego de hipótesis:

$$H_0: \mu_{\text{Ajusco}} = \mu_{\text{PNZ}} \quad \text{vs.}$$

$$H_a: \text{Las dos medias son diferentes } \mu_{\text{Ajusco}} \neq \mu_{\text{PNZ}}$$

Donde:

$$\mu_{\text{Ajusco}} = \mu + \tau_1$$

$$\mu_{\text{PNA}} = \mu + \tau_2$$

La regla de decisión fue:

$$\text{Rechazar } H_0 \text{ a un nivel } \alpha, \text{ si } F_c > F_t$$

En este caso F_t es el estadístico de decisión, al 95% de confianza ($\alpha = 0.05$) con parámetros p y v para $N=1985$ árboles, utilizado para probar las hipótesis anteriores donde $\mu_{\text{Localidad}}$ representa la media de la variable bajo comparación en cada área de estudio.

CUADRO 36. Resultado del análisis de varianza entre localidades.

RESÚMEN DE LOS NIVELES DE SIGNIFICANCIA MUESTRALES Y DECISIONES TOMADAS PARA LOS ANDEVAS DE LAS 3 VARIABLES Comparación entre localidades			
Variable	Valor F_c	$\hat{\alpha}$	Decisión
DAP	11.66	0.0006	rechazar H_0
LONG	1849.13	0.0001	rechazar H_0
ALT	430.33	0.0001	rechazar H_0

En todos los casos se rechazó H_0 por lo que se concluyó que existen diferencias estadísticas en los valores promedio de altura, diámetro normal y longitud del follaje entre las dos áreas de estudio; por lo que ambas localidades difieren entre sí respecto a las variables analizadas.

5.5. Análisis de la edad

En cada localidad se tomó una submuestra de 40 árboles de los que se tenía información de la edad, la altura y el diámetro normal, estos datos aparecen en el siguiente cuadro.

CUADRO 37. Resultados de la edad y el promedio de la altura para una submuestra de 80 árboles.

EDADES Y ALTURA PROMEDIO OBTENIDAS EN UNA SUBMUESTRA DE 40 ÁRBOLES DE CADA LOCALIDAD			
Localidad	Número de repeticiones	Edad Estimada (años)	Altura Promedio (metros)
Ajusco	2	17	2.2
	1	18	2.2
	8	19	2.5
	2	20	2
	5	21	2.8
	2	22	2.4
	3	23	2.9
	5	24	2.2
	2	25	3.6
	1	27	2.9
	3	28	2.5
	1	29	4.5
	1	30	1.7
	2	32	3.6
	1	34	6
	1	41	6.4
Total	40 árboles	$\bar{x} = 23.52$	$\bar{x} = 2.80$
Zoquiapan	3	17	5.6
	4	18	4
	5	19	2.5
	5	21	5.7
	6	22	4.9
	4	23	5.6
	5	24	6.4
	1	25	7
	1	26	5
	2	26	6.3
	2	28	6
	1	31	9
	1	34	5
Total	40 árboles	$\bar{x} = 22.27$	$\bar{x} = 5.20$

A los datos anteriores se les aplicó el siguiente modelo:

$$\text{Ln}(\text{alt}) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(\text{edad})$$

Los datos fueron analizados con **PROC GLM** de SAS para obtener una estimación de la pendiente y de la ordenada en la ecuación anterior; este procedimiento se efectuó con cada submuestra utilizando la altura promedio de los árboles de la misma edad. Los resultados de este análisis se presentan en el siguiente cuadro.

CUADRO 38. Estimación de los parámetros de la ecuación de crecimiento de cada sitio.

PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DE CRECIMIENTO EN ALTURA EN CADA LOCALIDAD							
Localidad	R²	Intercepto β_0			Pendiente β_1		
		Estimado	$\hat{\alpha}$	Error Estandar	Estimado	$\hat{\alpha}$	Error estandar
AJUSCO	0.391991	-1.6049987	0.0041	0.5260480	0.8283499	0.0001	0.167355
ZOQUIAPAN	0.314259	-1.6537096	0.0413	0.782752	1.0556452	0.0002	0.252966

Para probar si los dos modelos estimados de cada localidad se podían combinar en uno sólo, es decir si había homogeneidad de modelos, se utilizó la metodología de la hipótesis lineal general (Pindyck R.S. y D.L. Rubinfeld 1991; Walpole R.F. y R.H. Myers 1993).

Dados los modelos de crecimiento en cada localidad

EC_{Zoquiapan}

$$Y_{i1} = \beta_{01} + \beta_{11} X_{i1} + \varepsilon_{i1}$$

EC_{Ajusco}

$$Y_{i2} = \beta_{02} + \beta_{12} X_{i2} + \varepsilon_{i2}$$

Donde:

Y_{ij} = variable de respuesta de cada árbol i de la localidad j

β_{0j} = interceptada al origen de la localidad j

β_{1j} = pendiente de la ecuación de la localidad j

X_{ij} = logaritmo natural de la edad de cada árbol i de la localidad j

ε_{ij} = es el término del error tal que $\varepsilon_{ij} \sim \text{niid}(0, \sigma^2)$

Para

$i = 1, 2, \dots, 40$ árboles

$j = 1, 2$ localidades

De acuerdo a lo anterior, las hipótesis de interés son:

$$H_0: \beta_{01} = \beta_{02} \quad \text{vs.} \quad H_a: \beta_{01} \neq \beta_{02}$$

$$H_0: \beta_{11} = \beta_{12} \quad \text{vs.} \quad H_a: \beta_{11} \neq \beta_{12}$$

Las hipótesis anteriores pueden probarse en forma conjunta si se usa el modelo combinado:

$$Z_i = F_{i1} \beta_{01} + F_{i2} \beta_{02} + X_{i1}^* \beta_{11} + X_{i2}^* \beta_{12} + \varepsilon_i$$

Donde

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}(X'Y)$$

Es el vector de estimaciones del modelo

$$F_{i1} = \begin{cases} 0 & \text{si la observación es de Zoquiapan} \\ 1 & \text{si la observación es del Ajusco} \end{cases}$$

$$F_{i2} = \begin{cases} 0 & \text{si la observación es del Ajusco} \\ 1 & \text{si la observación es de Zoquiapan} \end{cases}$$

$$X_{i1}^* = \begin{cases} \chi_i & \text{si la observación es de Zoquiapan} \\ 0 & \text{si la observación es del Ajusco} \end{cases}$$

$$X_{i2}^* = \begin{cases} \chi_i & \text{si la observación es del Ajusco} \\ 0 & \text{si la observación es de Zoquiapan} \end{cases}$$

Con β_{01} , β_{02} , β_{11} y β_{12} definidas anteriormente

Para

Z_i = variable de respuesta observada

χ_i = valor del regresor en la observación i

$i = 1, 2, \dots, (n_1 + n_2)$ árboles

n_1 = número de observaciones en Zoquiapan

n_2 = número de observaciones en el Ajusco

En términos de la hipótesis lineal general, la prueba referida anteriormente puede efectuarse en forma conjunta, de acuerdo al siguiente juego de hipótesis:

$$H_0: C \underline{\beta} = \underline{\gamma} \quad \text{vs.} \quad H_a: C \underline{\beta} \neq \underline{\gamma}$$

Donde, para este caso

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad \underline{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_{01} \\ \beta_{02} \\ \beta_{11} \\ \beta_{12} \end{bmatrix} \quad \underline{\gamma} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

El estadístico de prueba es

$$F_c = \frac{(C\hat{\beta} - \gamma)' (C(X'X)^{-1}C')^{-1} (C\hat{\beta} - \gamma)}{CM(Error)}_2$$

Donde $\hat{\beta}$ es el vector de estimaciones del modelo

Para este caso, el estadístico de prueba obtenido en el análisis, a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, fue $F_c = 71.5735$ con un nivel de $\hat{\alpha} = 0.0001$

Con este resultado se rechaza H_0 y se concluye que los modelos son estadísticamente diferentes. De acuerdo con esto se tiene un modelo para cada localidad:

Ecuación de crecimiento en altura

Zoquiapan

$$Y_{i1} = -1.6537096 + 1.0556452 X_{i1} + \varepsilon_i$$

Ajusco

$$Y_{i2} = -1.6049987 + 0.8283499 X_{i2} + \varepsilon_i$$

Con los dos modelos anteriores se concluyó que ambas localidades difieren respecto a la tasa de crecimiento en altura, siendo más rápido el crecimiento en Zoquiapan ($\beta_{11} = 1.0556452$) que en el Ajusco ($\beta_{11} = 0.8283499$). Este resultado concuerda con el obtenido en el análisis de frecuencias y en el dasométrico, donde se encontró que en Zoquiapan predominan árboles de mayor talla que en el Ajusco, donde los árboles registran, en promedio, una menor altura.

Por otra parte, dado el valor que se obtuvo para el coeficiente de correlación lineal se concluyó que existe mucha variabilidad en las observaciones, pues en ambos modelos se obtuvo una baja correlación entre las dos variables analizadas ($R^2_{\text{PNZ}} = 0.31$ y $R^2_{\text{Ajusco}} = 0.39$), este resultado implica que cerca del 30% de la variación en altura es explicada por la edad, mientras que existen otras variables explicatorias no incluidas en este modelo.

Finalmente, se estimó el coeficiente de variación de la variable altura en las dos localidades, de acuerdo a la expresión:

$$C.V. = \frac{S_i}{\mu_i} \times 100\%$$

Donde:

μ_i = media en altura de la localidad i

S_i = desviación estandar de la variable altura en la localidad i

Para

$i = 1, 2$ localidades

En este caso se obtuvo para Zoquiapan un coeficiente de variación del **58.21%**, mientras que en el Ajusco fue de **40.46%**; el resultado anterior mostró que hay una mayor variación en las observaciones del Parque Nacional Zoquiapan, además de que explicó la gran variación registrada en los árboles de decisión proporcionados por SCREEN para esta localidad.

En las siguientes figuras se muestra la gráfica del modelo de crecimiento en altura de cada localidad.

Por otra parte, dado el valor que se obtuvo para el coeficiente de correlación lineal se concluyó que existe mucha variabilidad en las observaciones, pues en ambos modelos se obtuvo una baja correlación entre las dos variables analizadas ($R^2_{PNZ} = 0.31$ y $R^2_{Ajusco} = 0.39$), este resultado implica que cerca del 30% de la variación en altura es explicada por la edad, mientras que existen otras variables explicatorias no incluidas en este modelo.

Finalmente, se estimó el coeficiente de variación de la variable altura en las dos localidades, de acuerdo a la expresión:

$$C.V. = \frac{S_i}{\mu_i} \times 100\%$$

Donde:

μ_i = media en altura de la localidad i

S_i = desviación estandar de la variable altura en la localidad i

Para

$i = 1, 2$ localidades

En este caso se obtuvo para Zoquiapan un coeficiente de variación del **58.21%**, mientras que en el Ajusco fue de **40.46%**; el resultado anterior mostró que hay una mayor variación en las observaciones del Parque Nacional Zoquiapan, además de que explicó la gran variación registrada en los árboles de decisión proporcionados por SCREEN para esta localidad.

En las siguientes figuras se muestra la gráfica del modelo de crecimiento en altura de cada localidad. Ambas gráficas se construyeron utilizando los datos de la edad de la submuestra de 80 árboles.

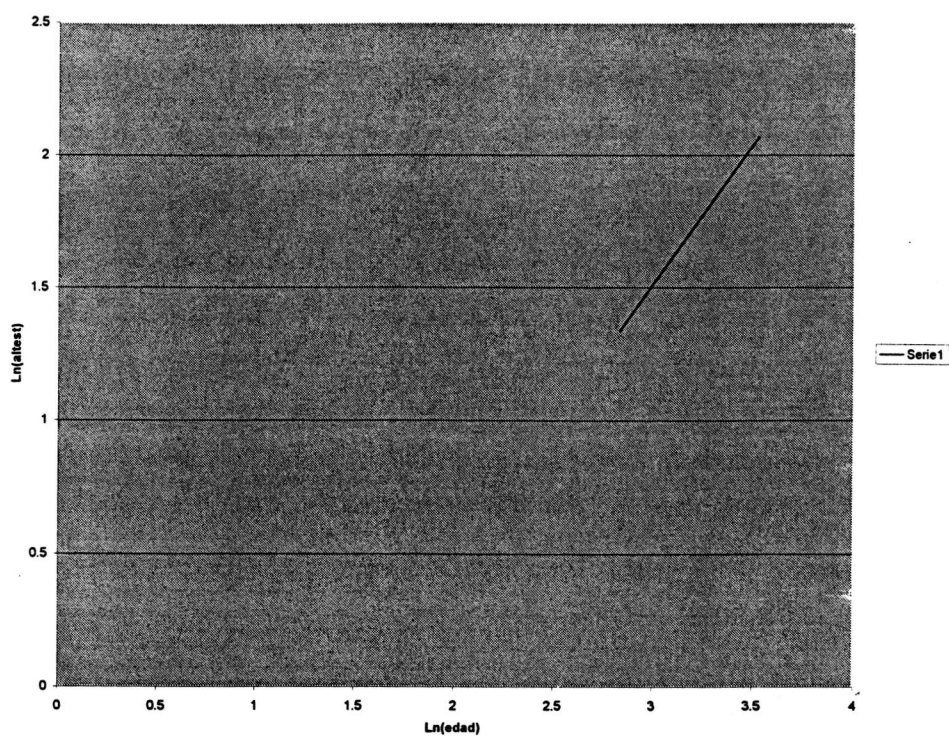


Figura 17. Modelo de crecimiento en altura para la localidad de Zoquiapan.

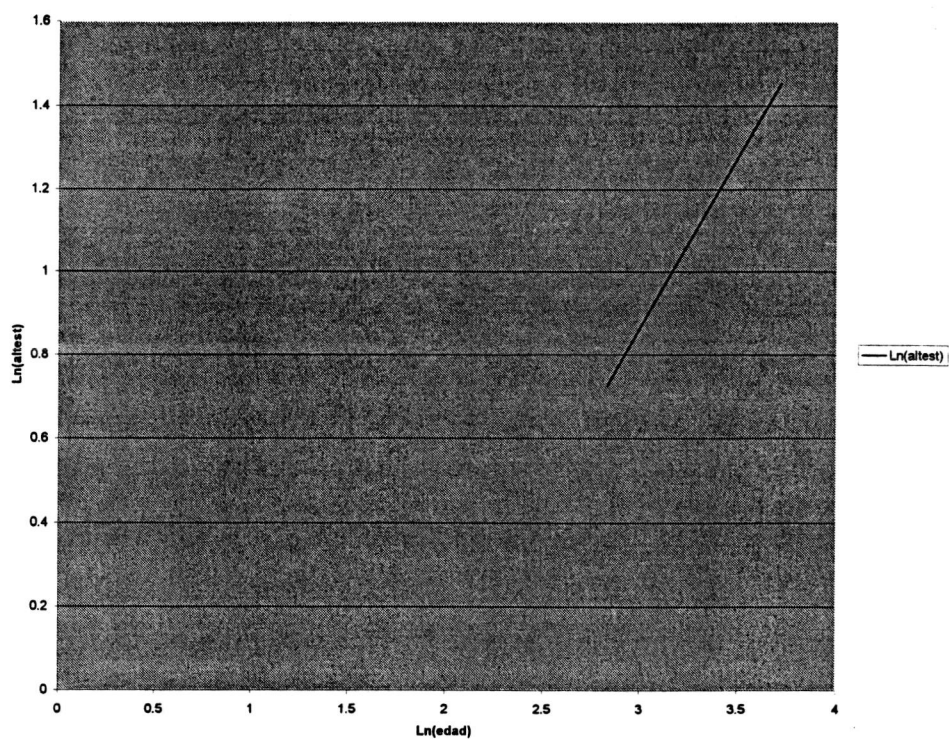


Figura 18. Modelo de crecimiento en altura para la localidad del Ajusco.

5.6. Análisis de biodiversidad

Con los descortezadores colectados en los árboles derribados se efectuó un análisis de biodiversidad entre ambas localidades; para ello se identificaron a nivel de especie todos los insectos de la familia Scolytidae que emergieron de las cubas durante el tiempo en que se efectuaron los derribos: de julio de 1996 a enero del siguiente año; después de realizar la identificación se contabilizó el número de individuos por especie. Esta información fue utilizada para realizar el análisis de biodiversidad con el índice de Shannon-Weiner; el resultado de este análisis se complementó con el método de rarefacción para la estimación de la riqueza de especies y con del puntos de Whittaker (Krebs C. 1989) para poder efectuar la comparación entre ambas comunidades.

5.6.1. El índice de Shannon-Weiner

Los índices de diversidad corresponden a una medida estimada del número de las especies que contiene una comunidad; algunos de estos índices, para evaluar la diversidad biológica de un área, combinan dos conceptos ecológicos: riqueza y equitabilidad de especies (dominancia de algunas especies frente a otras), que en conjunto dan origen al concepto de heterogeneidad ambiental (Krebs C.J. 1989). De esta forma, en un ecosistema en particular es posible evaluar la diversidad biológica utilizando información sobre la heterogeneidad de la comunidad, la cual se cuantifica por el número de especies y su abundancia relativa.

La función de Shannon-Weiner es uno de los índices de heterogeneidad más comúnmente utilizados para evaluar la biodiversidad. Consiste en una medida de la información que podría estar contenida en una muestra aleatoria extraída de una comunidad, en una escala de cero a cinco; para su estimación se requiere de que la muestra contenga una cantidad relativa de las s especies presentes (Pielou E.C., 1975), a cada especie se le asocia una proporción p_i que representa la proporción de la comunidad que pertenece a la i -ésima especie (desde $i=1 \dots s$) de acuerdo a la función:

$$H' = - \sum_j p_i \log p_i$$

Donde $H' = \text{Índice de diversidad de especies}$

Las propiedades de esta función son:

1. A un valor dado de especies s , H' puede tener un máximo valor para un número de individuos n , cuando cada uno de ellos pertenece a diferente especie; en este caso $p_i = 1/s$ para todo i , bajo estas condiciones la comunidad se encuentra totalmente equilibrada.
2. Cuando se tienen dos comunidades completamente equilibradas, una con s especies y otra con $s + 1$ especies, el mayor valor de H' podría corresponder a esta última.

De acuerdo al primer punto, H' tomaría un valor máximo en una comunidad donde el número de individuos por especie es el mismo, mientras que en una comunidad dominada por una o pocas especies H' tendería a ser menor (Pielou E. C. 1975; Heyer W.R. et al. 1994).

En sentido biológico, la función de Shannon-Weiner es una estimación del número esperado de especies que existen una comunidad de gran tamaño en la cuál el número total de especies es conocido; como en general se desconoce este número se asume que este índice es aplicable a comunidades muy grandes que tienden a infinito, de las que pueden extraerse muestras aleatorias sin causar un cambio significativo en ella, asumiendo que todas o muchas de las especies están representadas en las muestras.

Este índice también puede expresarse en forma exponencial:

$$N_1 = e^{H'}$$

Donde

$$e=2.71828$$

H' = *Función de Shannon-Weiner (calculada con logaritmo en base e)*

N_1 = *Número de especies igualmente comunes las cuales producen la diversidad H*

En la expresión anterior, cuando se utiliza una base de logaritmo diferente se sustituye e por la base utilizada.

Esta medida de la diversidad, basada en la función de Shannon-Weiner, es reconocida como de tipo I, a esta categoría corresponden los índices de heterogeneidad sensibles a las especies raras de la muestra; mientras que las de tipo II son sensibles a las especies más comunes.

En general, H' es un estimador sesgado que depende del procedimiento de muestreo y del número de individuos de la muestra; por lo que el H' estimado es menor que el verdadero H' . Por este motivo, en las grandes comunidades donde el número total de especies es conocido se recomienda utilizar este estimador, mientras que en comunidades pequeñas es preferible utilizar otro índice de diversidad; y solamente en el caso de que la comunidad sea suficientemente grande, es factible utilizar la función de Shannon-Weiner. Por ser un estimador sesgado, comúnmente se utiliza una corrección para el sesgo de H' que es proporcionada por el procedimiento de Jackknife, el cual reduce el sesgo y estima el error estándar de H' tal que se pueden construir los intervalos de confianza de la función.

El procedimiento de Jackknife establece:

$$\hat{S} = s + \left(\frac{n-1}{n} \right)^k$$

Donde

$\hat{S}$ = *estimador de Jackknife para la riqueza de especies*

s = *número total observado de especies presentes*

n = *número total de cuadrantes*

k = *número de especies únicas*

La varianza de este estimador esta dada por:

$$\text{var}(\hat{S}) = \left(\frac{n-1}{n} \right) \left[\sum_{j=1}^s (j^2 f_j) - \frac{k^2}{n} \right]$$

Donde

var $\hat{S}$ = varianza del estimador de Jacknife de riqueza de especies

f_j = número de cuadrantes que contienen j especies únicas $j=1,2,3,\dots,s$

k = número de especies únicas

n = número total de cuadrantes muestreados

Con la varianza se pueden construir los límites de confianza para el estimador, de acuerdo a:

$$\hat{S} \pm t_{\alpha} \sqrt{\text{var}(\hat{S})}$$

En este caso t_{α} es el valor crítico de la distribución *t-student* para $n-1$ grados de libertad a un α determinado.

Finalmente, una ventaja adicional de los índices de diversidad es que, cuando proceden de diferentes localidades o transectos, pueden ser comparados entre sí por medio de técnicas estadísticas paramétricas, debido a que estos índices se distribuyen normalmente; así mismo, su carácter aditivo permite dividir la información para obtener grupos más pequeños sobre los cuales realizar el análisis.

5.6.2. Estudios comparativos de la diversidad entre comunidades

Existen muchos procedimientos para evaluar la diversidad de una comunidad biológica, algunos de ellos se basan en la estimación de la riqueza de especies, su abundancia o su equitabilidad, en otros casos se puede estimar la heterogeneidad de especies; no obstante, sea cual sea el método para evaluar la diversidad, existen una serie de recomendaciones propuestas por varios investigadores (Pielou E. C. 1975; Krebs C.J. 1989; Heyer W.R. *et al.* 1994) para reducir el error de la estimación y obtener una mejor comparación de la diversidad entre comunidades, o bien para utilizar el índice más apropiado al evaluar la diversidad de una área bajo estudio. Las recomendaciones más frecuentes propuestas por los autores referidos anteriormente, se enlistan a continuación.

- ❖ En las grandes comunidades la diversidad puede ser estimada a partir de una muestra que contiene una proporción p_i de las especies de la comunidad; al extraer una serie de muestras de la misma se debe considerar que se distribuyan aleatoriamente en la superficie del terreno para que se reduzca el sesgo en la estimación de H' . Así mismo, se recomienda que las muestras sean suficientemente grandes y que sean extraídas por procedimientos de muestreo iguales o similares, además de que los individuos muestreados deben ser de la misma categoría taxonómica o al menos estar emparentados taxonómicamente.
- ❖ Por otra parte, al realizar comparaciones entre comunidades, se sugiere que estas sean bajo las mismas condiciones de habitat, pues la diversidad cambia en función de las propiedades de la comunidad, en este caso las áreas o volúmenes muestreados deben ser equivalentes en espacio y tiempo, además de ser seleccionados aleatoriamente en habitats similares.
- ❖ El procedimiento anterior facilita la interpretación de la riqueza, la equitabilidad y la diversidad, además de que aumenta la validez de las comparaciones efectuadas entre localidades; así mismo elimina la necesidad de realizar algunas pruebas que de otro modo son necesarias, como la de la rarefacción.

5.6.3. La técnica de la rarefacción

Es un procedimiento alternativo para la estimación de la riqueza de especies entre localidades. Esta técnica facilita la interpretación y la comparación cuando se tienen tamaños de muestra diferentes; el procedimiento permite estandarizar las muestras a un tamaño común para estimar el número de especies esperadas en una muestra aleatoria de tamaño dado. En este caso se realizan una serie de análisis con $(n < N)$, donde n representa el tamaño de muestra estándar establecido a criterio del investigador y N es el número total de individuos para S especies identificadas en la muestra, en este caso ($s < S$) donde s es el número esperado de especies, de acuerdo a la expresión:

$$E(\hat{S}_n) = \sum_{i=1}^s \left[1 - \frac{\binom{N - N_i}{n}}{\binom{N}{n}} \right]$$

En este caso

$E(\hat{S}_n)$ = número total de especies en la muestra

N_i = número de individuos de la especie i desde $i=1,2,\dots,s$

N = Número total de individuos

n = tamaño de muestra estandarizada ($n < N$)

$\binom{N}{n}$ = número de combinaciones posibles de n individuos tomados al azar de un conjunto de N individuos = $N! / n! (N-n)!$

5.6.4. Series logarítmicas de abundancia de especies

Al realizar comparaciones entre la diversidad de dos o más comunidades, se debe de construir una serie logarítmica de la abundancia de las especies para reducir el posible error debido a los diferentes tamaños de muestra o las diferencias que pudieran existir entre las condiciones ambientales de cada sitio. Para efectuar este procedimiento

se grafica la abundancia relativa en porcentaje de las especies de la muestra contra el número de especies identificadas ordenadas de mayor a menor abundancia sobre el eje x ; para realizarlo se busca la relación que existe entre el *número de especies atrapadas* y el *número de individuos de la muestra*, de acuerdo a la función:

$$\frac{S}{N} = \frac{1-x}{x} [-\log_e (1-x)]$$

Con

S = número de especies en la muestra

N = número total de individuos en la muestra

x = parámetro de la serie logarítmica

donde x toma el valor de acuerdo a:

$$\alpha x, \frac{\alpha x^2}{2}, \frac{\alpha x^3}{3}, \frac{\alpha x^4}{4}, \dots$$

con αx = número de especies del total capturado con un solo individuo

$\frac{\alpha x^2}{2}$ = número de especies representadas por dos individuos, etc.

El valor de α se estima por una serie de ensayos para x con:

$$\alpha = \frac{N(1-x)}{x}$$

donde α = Índice de diversidad de la serie logarítmica

En este caso, la varianza de la muestra esta dada por

$$\text{var}(\hat{\alpha}) = \frac{\alpha}{-\log_e(1-x)}$$

Para complementar este método se grafica una curva de abundancia de especies sobre una escala aritmética o logarítmica; para ello, los datos de abundancia relativa, densidad, cobertura o alguna otra medición de las especies, se colocan sobre el *eje y*; mientras que en el *eje x* se ordenan las especies por rangos desde 1 (la especie más abundante) hasta n (la especie más rara). A este procedimiento se le denomina *puntos de Whittaker*, la curva teórica para una serie logarítmica puede ser estimada para n especies, de acuerdo a la expresión:

$$R = \alpha E_1 \left[n \log_e \left(1 + \frac{\alpha}{N} \right) \right]$$

donde

R = rango de las especies (*eje x*) desde $i = 1, 2, \dots, s$

α = índice de diversidad estimado anteriormente

n = número de individuos esperados para un valor de R específico (*eje y*)

N = total de individuos de la muestra

E_1 = integral exponencial estándar

Con este resultado se comparan ambas curvas, la teórica y la verdadera; la bondad de ajuste para el primer caso, puede ser estimada mediante una prueba de ji cuadrada o bien, contrastarse con la información ecológica disponible sobre la comunidad en estudio; esta última opción es la más frecuente al realizar estudios estimativos sobre la abundancia de las especies en un área específica.

Finalmente, después de efectuar los puntos anteriores, se recomienda seleccionar el índice de diversidad más adecuado a los propósitos del estudio; en general se utiliza el índice de Simpson cuando se desea basar el análisis en las especies más comunes o el índice de Shannon-Weiner para efectuar el análisis basado en las especies más raras de la comunidad. En ambos casos los dos índices son igualmente adecuados y pueden usarse indistintamente, por lo que la decisión sobre cuál utilizar debe apoyarse principalmente en la experiencia y en el criterio del investigador.

5.6.5. La biodiversidad en cada área de estudio

Algunos de los métodos descritos anteriormente fueron utilizados para el análisis de la diversidad de cada localidad. Como se tenían tamaños de muestra diferentes se aplicó el procedimiento de rarefacción para estimar la riqueza de especies entre sitios, este procedimiento se efectuó con el programa RAREFAC modificado por Krebs (1989), el cuál fue adaptado para realizar con mayor facilidad las corridas. Para la estimación de la diversidad se empleó el índice de Shannon-Weiner; ambos procedimientos fueron complementados con la estimación de la curva teórica de puntos de Whittaker y con la curva de abundancia de especies, en este último caso se utilizó el programa LOGSERIE modificado por Krebs (1989), al que también se le hicieron algunas adaptaciones. Ambos programas, RAREFAC y LOGSERIE, están escritos en FORTRAN 4.

5.6.5.1. La diversidad de insectos descortezadores en el Ajusco

En esta localidad se colectaron en total **507 individuos** distribuidos entre **14 especies** de scolytidae. En este caso, la especie más abundante fue *Ips bonansea* que registró una proporción de **0.878** individuos, seguida de *Hylurgops longipennis* con una proporción de **0.035**. Los resultados se muestran enseguida.

CUADRO 39. Lista de especies identificadas en el Ajusco.

Especies de descortezadores	Número de individuos por especie n_i	Abundancia Proporcional p_i
<i>Ips bonansea</i>	445	0.878
<i>Hylurgops longipennis</i>	18	0.035
<i>Gnathotrichus sulcatus</i>	11	0.021
<i>Ips integer</i>	8	0.016
<i>Dendroctonus adjunctus</i>	6	0.012
<i>Pityophthorus</i> # 5	6	0.012
<i>Pityophthorus</i> # 4	3	0.006
<i>Gnathotrichus nitidifrons</i>	3	0.006
<i>Pityophthorus</i> # 7	2	0.004
<i>Pityophthorus</i> # 6	1	0.002
<i>Pityophthorus</i> # 1	1	0.002
<i>Hylurgops planirostris</i>	1	0.002
<i>Gnathotrichus deleoni</i>	1	0.002
<i>Ips mexicanus</i>	1	0.002
Total	507	1.0

Con las observaciones anteriores del número de individuos, se estimó el porcentaje de abundancia por especie; esta información fue graficada para obtener una curva de abundancia relativa. El procedimiento consiste en ordenar a las especies en un rango numérico de *1 a s* (*total de especies*) sobre el eje *x*, de acuerdo al número de individuos de cada una de ellas; sobre el eje *y* se sitúa la abundancia relativa o su transformación en escala logarítmica.

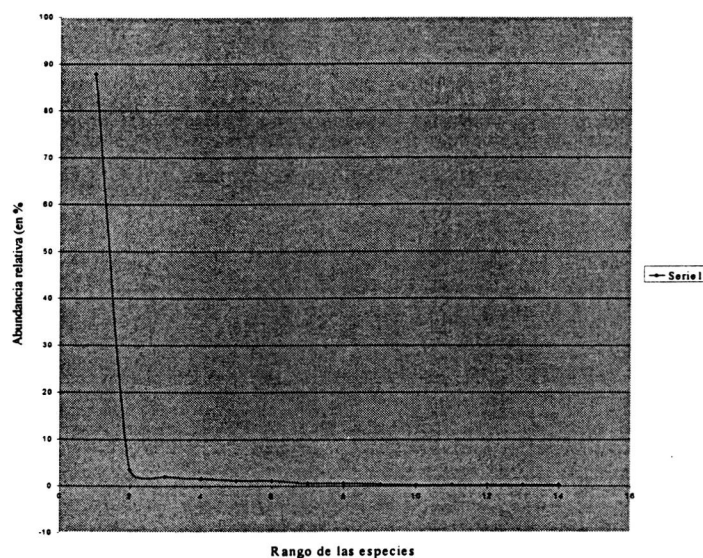


Figura 19. Curva de abundancia relativa de especies de insectos descortezadores en el Ajusco. Hospedero *Pinus hartwegii*.

Con el programa RAREFAC (Krebs C.J. 1989) se estimó la riqueza de especies para 5 muestras con diferente número de individuos; el valor inicial para la muestra estandarizada fue de 100 ($n < N$) y se fue incrementando de 100 en 100 hasta 500. Además de este resultado, se obtuvo la desviación estándar para cada una de las muestras estandarizadas.

CUADRO 40. Riqueza de especies estimada con el programa RAREFAC.

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO ESPERADO DE ESPECIES MÉTODO DE RAREFACCIÓN Localidad: Ajusco			
Número de Individuos	Número esperado de especies	Varianza	Desviación estándar
100	7.5029	2.0578	1.4345
200	10.0459	1.8441	1.3580
300	11.6478	1.4618	1.2090
400	12.8820	0.8842	0.9403
500	13.9308	0.0677	0.2602

En el cuadro anterior se aprecia que al aumentar el número de individuos disminuye la varianza a la vez de que el número de especies estimado es cercano al verdadero obtenido en el muestreo; la gráfica de estos resultados indica que la curva de especies estimadas es creciente y que aun no llega a la parte sintótica, esto podría deberse a que, comparativamente con Zoquiapan, falta realizar un muestreo más extensivo de las especies de descortezadores del área, ya que de acuerdo a la revisión literaria y a los resultados de campo, en esta localidad se podría esperar un mayor número de especies que el obtenido hasta el momento para la especie de pino bajo estudio.

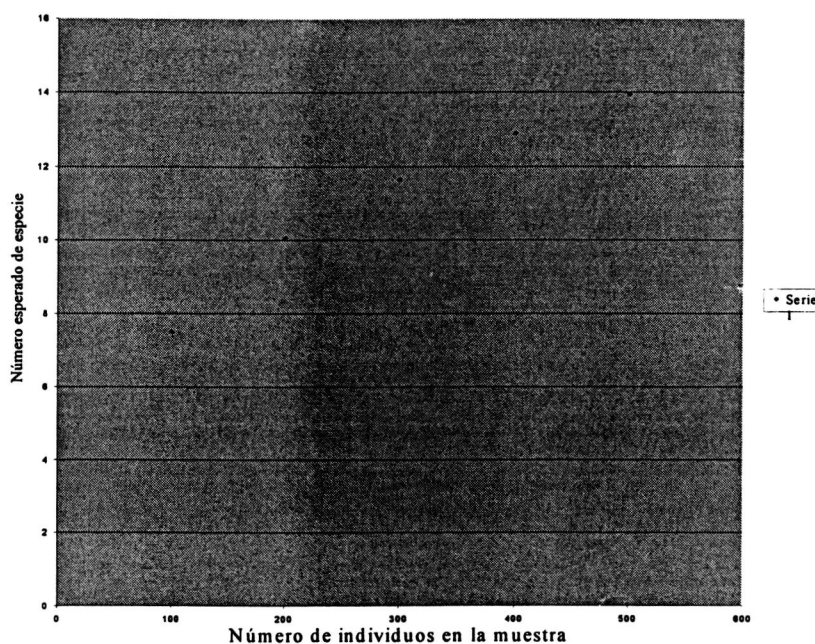


Figura 20. Curva de rarefacción para la comunidad de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii*, localidad Ajusco, D.F.

Con los datos originales se construyó la curva de abundancia logarítmica de especies, esta curva fue empleada para comparación con la curva teórica de Whittaker; en los dos casos las especies fueron ordenadas en un rango de importancia en función de su abundancia, en la primera curva se graficó el rango de las especies contra su abundancia, los datos de número de individuos por especie fueron transformados a

escala logarítmica para construir una curva de abundancia de especies que pudiera ser comparada con la gráfica de puntos de Whittaker; para estimar a esta última se empleó el programa LOGSERIE (Krebs C.J. 1989), los resultados que proporcionó dicho programa son los siguientes.

CUADRO 41. Curva de especies estimada por el programa LOGSERIE.

AJUSTE DE LOS DATOS DE ABUNDANCIA UNA SERIE LOGARÍTMICA MÉTODO DE PUNTOS DE WHITTAKER Localidad: Ajusco			
Parámetros estimados de la Serie logarítmica		Especie	Proporción (p_i)
		1	0.40590
		2	0.21653
var($\hat{\alpha}$)	0.5072	3	0.13084
		4	0.08357
		5	0.05459
$\hat{\alpha}$	2.6645	6	0.03629
		7	0.02440
		8	0.01647
x	0.994772	9	0.01128
		10	0.00762
		11	0.00518
N	507	12	0.00335
		13	0.00244
		14	0.00152

Con las abundancias predichas (número estimado de individuos por especie) se construyó la gráfica de puntos de Whittaker; para ello, se utilizó una transformación logarítmica, y se construyó una grafica de las especies contra el logaritmo de la abundancia, para ello las especies se ordenaron sobre el *eje x* de acuerdo a un rango de importancia que asigna a la especie con más individuos el número *uno*, seguida de la segunda especie más representativa a la que da el número *dos*, y así sucesivamente hasta *s* que es el número total de especies de la muestra.

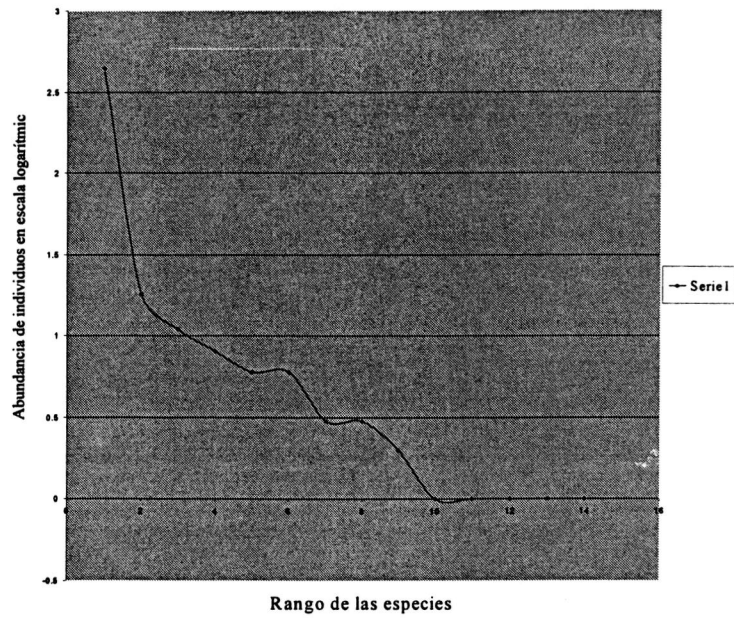


Figura 21. Curva de abundancia de especies en escala logarítmica para 14 especies de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii* en el Ajusco.

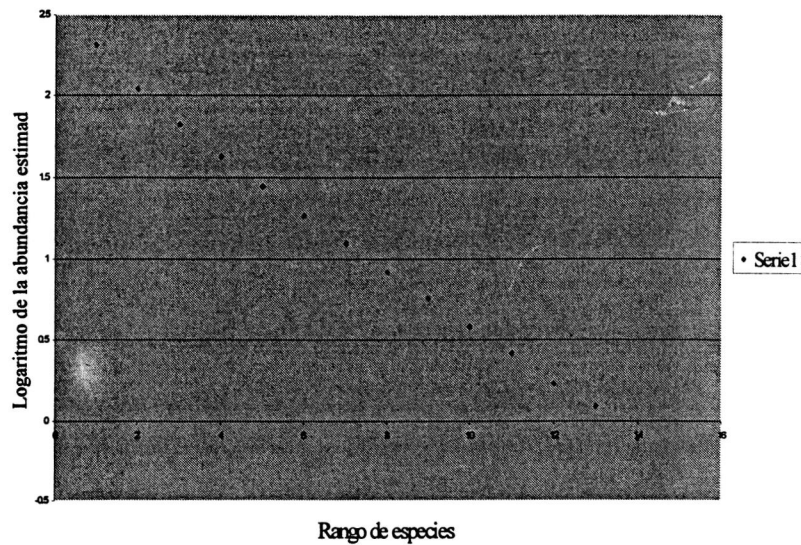


Figura 22. Curva teórica de Whittaker para la abundancia relativa de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii* en la localidad del Ajusco, D.F.

5.6.5.2. La diversidad de insectos descortezadores en Zoquiapan

En esta localidad se obtuvo un total de **3067 individuos** pertenecientes a **13 especies** distintas de insectos descortezadores de la familia Scolytidae: Como en el Ajusco, la especie dominante fue *Ips bonansea* que alcanzó una proporción del **0.848** de la muestra, seguida de *Dendroctonus adjunctus* con una proporción del **0.038**; en este caso, la especie menos abundante fue *Dendroctonus approximatus* con solo una proporción de **0.0007** sobre el total de la muestra. El listado de especies colectadas se muestra a continuación.

CUADRO 42. Lista de especies identificadas en Zoquiapan.

Especies De Descortezadores	Número de individuos por especie n_i	Abundancia Proporcional p_i
<i>Ips bonansea</i>	2600	0.848
<i>Dendroctonus adjunctus</i>	118	0.038
<i>Gnathotrichus sulcatus</i>	87	0.030
<i>Pityophthorus</i> # 4	82	0.027
<i>Pityophthorus</i> # 1	58	0.019
<i>Pityophthorus</i> # 7	42	0.014
<i>Ips mexicanus</i>	22	0.007
<i>Pityophthorus</i> # 2	20	0.007
<i>Gnathotrichus nitidifrons</i>	16	0.005
<i>Pityophthorus</i> # 5	13	0.004
<i>Gnathotrichus deleoni</i>	4	0.001
<i>Pityophthorus</i> # 3	3	0.001
<i>Dendroctonus approximatus</i>	2	0.0007
Total	3067	1.0

Al igual que en el Ajusco, se construyó la curva de abundancia de especies utilizando el porcentaje de abundancia relativa y una transformación de los datos a escala logarítmica para ser comparada con la curva teórica de Whittaker. La curva de abundancia relativa se presenta a continuación.

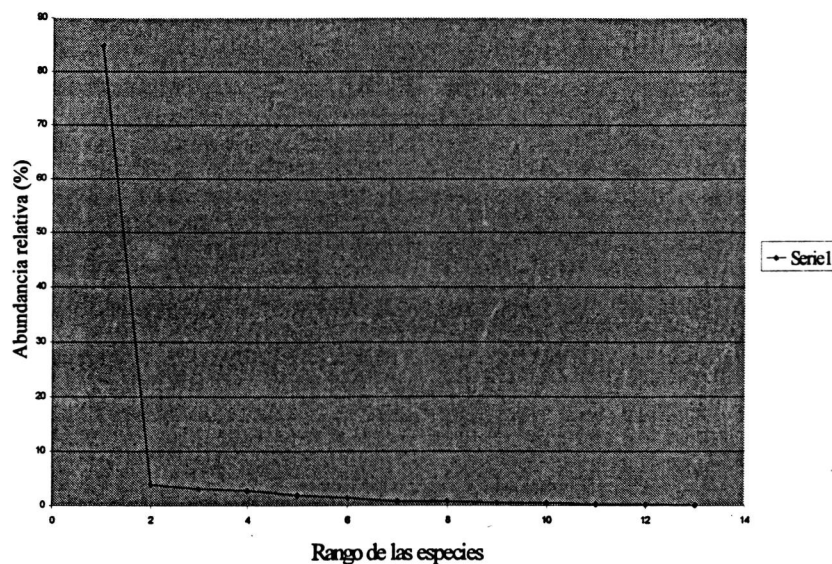


Figura 23. Curva de abundancia relativa de especies de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii*, localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.

Al realizar el procedimiento de rarefacción para las siguientes muestras estandarizadas ($n < N$), se obtuvo el siguiente cuadro:

CUADRO 43. Riqueza de especies estimada con el programa RAREFAC.

ESTIMACIÓN DEL NÚMERO ESPERADO DE ESPECIES MÉTODO DE RAREFACCIÓN Localidad: Zoquiapan			
Número de Individuos	Número esperado de especies	Varianza	Desviación estándar
100	7.5254	1.6009	1.265
200	9.2238	1.3328	1.1545
300	10.0907	0.1265	1.0614
400	10.6373	0.9827	0.9913
500	11.0185	0.8887	0.9427
1000	12.0256	0.6311	0.7944
2000	12.8224	0.1609	0.4011
3000	12.9995	0.0005	0.0219

Con el propósito de observar la variación en el número esperado de especies entre ambas localidades, se efectuó el análisis con 5 muestras estandarizadas de igual tamaño que variaban de 100 en 100 hasta 500 individuos; adicionalmente se incluyeron 3 muestras más que variaban de mil en mil hasta un máximo de tres mil individuos, para ver el comportamiento de la curva esperada de riqueza de especies, por debajo del número observado de individuos ($N = 3067$) de la muestra de Zoquiapan; con estos datos se realizó la figura 24.

Para esta localidad, la curva se comporta de manera ascendente y empieza a hacerse asintótica, no obstante todavía muestra crecimiento; este resultado pone de manifiesto que aun faltan por coleccionar algunas de las especies que existen en la localidad. La conclusión anterior se apoya en la revisión bibliográfica y en la consulta a los insectarios del Valle de México que incluyen en sus registros un mayor número de especies que el obtenido en este trabajo.

Por otro lado, con el programa LOGSERIE se estimó la curva teórica de puntos de Whittaker, a partir de una serie logarítmica. Los resultados que proporcionó este programa se muestran en el cuadro.

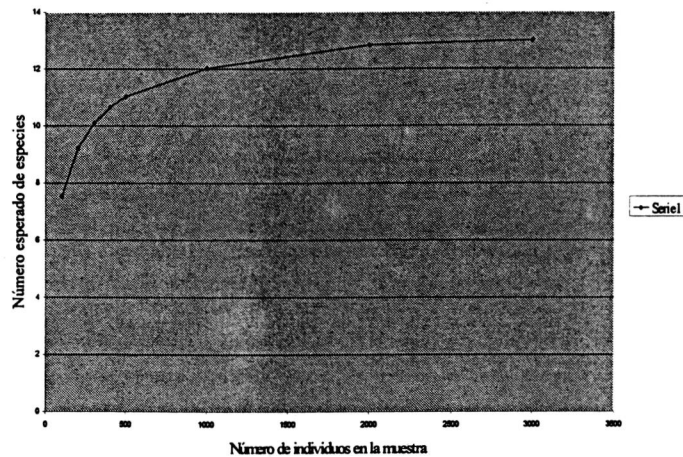


Figura 24. Curva de rarefacción para la comunidad de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii*, localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.

CUADRO 44. Curva de especies estimada por el programa LOGSERIE.

AJUSTE DE LOS DATOS DE ABUNDANCIA UNA SERIE LOGARÍTMICA MÉTODO DE PUNTOS DE WHITTAKER Localidad: Zoquiapan				
Parámetros estimados de la Serie logatítmica		Especie	Número estimado de individuos por especie	Proporción (p _i)
		1	1572.995	0.51288
		2	705.831	0.23014
var($\hat{\alpha}$)	0.2323	3	360.054	0.11740
		4	192.481	0.06276
		5	105.399	0.03437
$\hat{\alpha}$	1.7368	6	58.283	0.01900
		7	32.433	0.01057
		8	18.133	0.00591
x	0.999434	9	10.067	0.00328
		10	5.669	0.00185
		11	3.105	0.00101
N	3067	12	1.641	0.00053
		13	0.909	0.00030

Con los datos del número de individuos por especie se graficó la curva de abundancias en escala logarítmica, para contrastarla con la grafica de puntos de Whittaker; esta última fue construida con el logaritmo de las abundancias predichas.

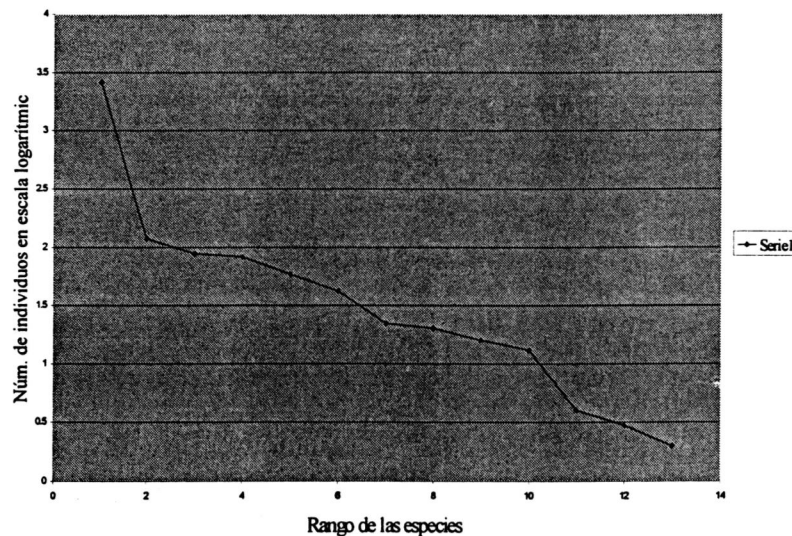


Figura 25. Curva de abundancia de especies en escala logarítmica para 13 especies de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii* en Zoquiapan.

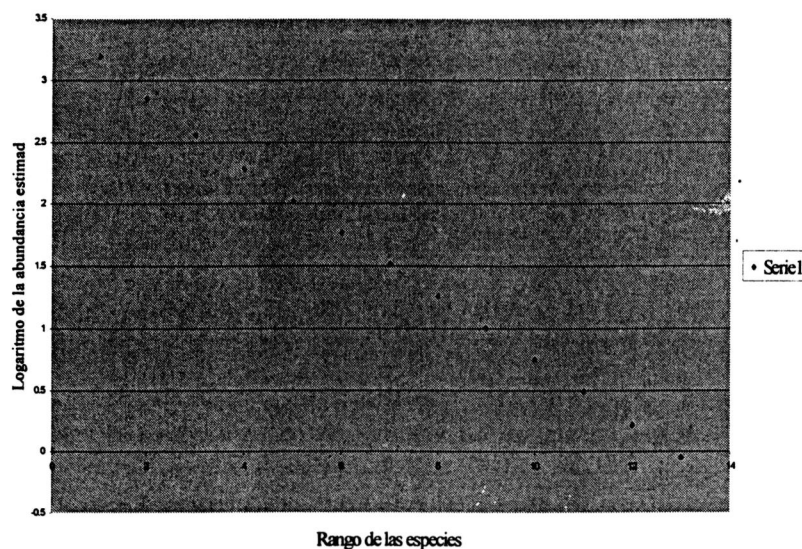


Figura 26. Curva teórica de puntos de Whittaker para la abundancia predicha de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii*, localidad Zoquiapan, Edo. de Méx.

Para comparar la abundancia observada con la teórica, se utilizó la abundancia registrada en cada área de estudio y la abundancia predicha, generada con el procedimiento de la serie logarítmica; a estos datos se les aplicó una prueba de ji-cuadrada para estimar la bondad de ajuste (Magurran A.E. 1983) de acuerdo a:

$$\chi^2 = (\text{abundancia observada} - \text{abundancia esperada})^2 / \text{abundancia esperada}$$

Ajusco o Zoquiapan

Ho: la abundancia observada y la esperada tienen la misma distribución

Ha: sus distribuciones son diferentes

La regla de decisión: rechazar Ho si $\chi_c^2 > \chi_t^2$

Donde χ_t^2 es el valor del estadístico de la tabla de distribución de ji-cuadrada, a un nivel de significancia α y $k-1$ *grados de libertad*. Los resultados de esta prueba se muestran a continuación.

Ajusco:

$$\chi_{\text{Ajusco}}^2 = 0.9206$$

En este caso, se tuvo $k = 14$ *especies de insectos descortezadores* para $\alpha = 0.05$ que corresponde a un valor de tablas de $\chi_{(0.95,13)}^2 = 22.362$

Zoquiapan

$$\chi_{\text{PNZ}}^2 = 0.4793$$

Para $k = 13$ *especies de insectos descortezadores*, el valor en la tabla de distribución de ji-cuadrada para estos parámetros fue de $\chi_{(0.95,12)}^2 = 21.026$

Para cada localidad se concluyó que no existe diferencia significativa entre la abundancia observada y la abundancia esperada de insectos descortezadores de pino.

5.6.6. Estimación del índice de diversidad en cada sitio

Con la abundancia proporcional del número de individuos por especie (p_i), se estimó la función de Shannon-Weiner por localidad; de acuerdo a la expresión:

Ajusco

$$H' = -[(0.878 * \ln 0.878) + (0.035 * \ln 0.035) + + (0.002 * \ln 0.002)]$$

$$H'_{Ajusco} = 0.626$$

La varianza se estimó a partir de:

$$Var(H'_i) = \frac{\sum p_i (\ln p_i)^2 - (\sum p_i \ln p_i)^2}{N} - \frac{s-1}{2N^2}$$

Donde:

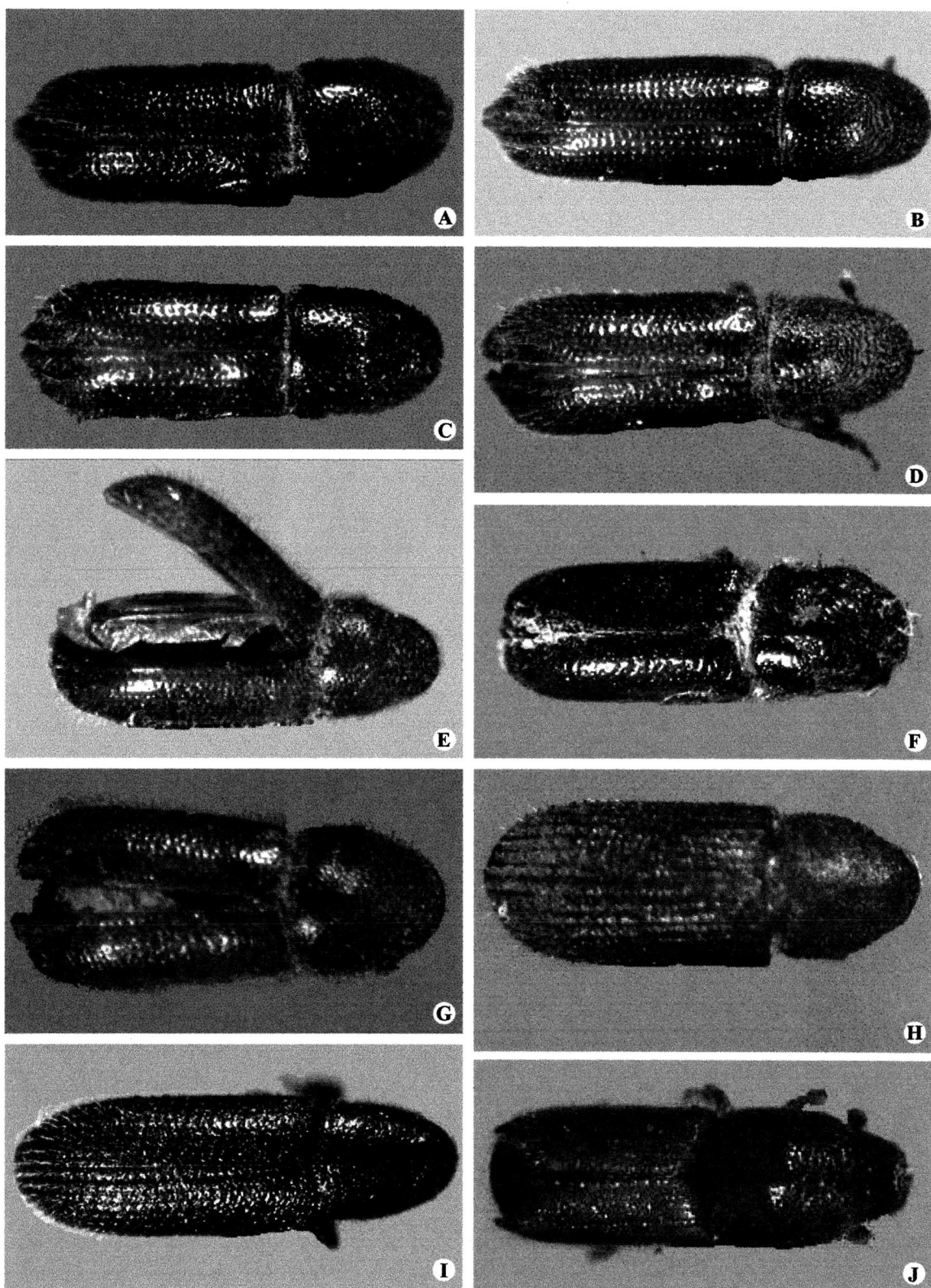
s = número total de especies observado en la muestra

N = número de total de individuos de la muestra

Para la localidad de Ajusco se obtuvo:

$$Var(H'_{Ajusco}) = \frac{2.281 - 0.026^2}{507} - \frac{14-1}{2(507)^2}$$

$$Var(H'_{Ajusco}) = 0.0037$$



Algunos de los insectos descortezadores de pino colectados en el área de estudio. A. *Pityophthorus* sp. 1. B. *Pityophthorus* sp. 2. C. *Pityophthorus* sp. 3 (*P. furnissi*). D. *Pityophthorus* sp. 4. E. *Pityophthorus* sp. 5. F. *Pityophthorus* sp. 6. G. *Pityophthorus* sp. 7 (*P. aztecus*). H. *Hylurgops planirostris*. I. *Hylurgops longipennis*. J. *Ips bonanseai*.

El mismo procedimiento se aplicó en Zoquiapan, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Zoquiapan

$$H' = [(0.848 * \ln 0.848) + (0.038 * \ln 0.038) + \dots + (0.0007 * \ln 0.007)]$$

$$H'_{PNZ} = 0.733$$

La varianza correspondiente fue:

$$Var(H'_{PNZ}) = \frac{2.437 - 0.733^2}{3067} - \frac{13 - 1}{2(3067)^2}$$

$$Var(H'_{PNZ}) = 0.00062$$

Al comparar la diversidad de insectos descortezadores entre ambos bosques, se utilizó el estadístico:

$$t = \frac{H'_1 - H'_2}{[Var(H'_1) + Var(H'_2)]^{1/2}}$$

Para probar el juego de hipótesis:

Ho: la diversidad de insectos descortezadores es igual en Ajusco y Zoquiapan

Ha: la diversidad de insectos descortezadores es diferente en cada sitio

De acuerdo a la regla de decisión:

Rechazar H_0 si $t_c > t^0$

Donde, t^0 es el valor crítico del estadístico de decisión en la tabla de distribución *t de Student*, a un nivel de significancia α y *df* *grados de libertad*. En este caso, los grados de libertad están dados por:

$$df = \frac{[Var(H'_1) + Var(H'_2)]^2}{\left[\left(\frac{Var(H'_1)^2}{N_1} \right) + \left(\frac{Var(H'_2)^2}{N_2} \right) \right]}$$

Después de estimar la varianza correspondiente al índice de Shannon-Weiver de cada localidad, se estimó el estadístico:

$$t_c = \frac{0.733 - 0.626}{(0.00062 + 0.0037)^{1/2}}$$

$$t_c = 1.628.$$

El valor del estadístico de decisión, para un nivel de significancia $\alpha = 0.05$ y *df* = 686 *grados de libertad*, fue $t^0 = 1.650$. Este resultado muestra que no existe diferencia significativa entre la diversidad de ambos bosques; por lo que se concluyó que en Ajusco y Zoquiapan la diversidad de insectos descortezadores de *Pinus hartwegii* es la misma.

Por otra parte, se efectuó una segunda estimación de la diversidad con el índice de Simpson, que establece la probabilidad de extraer al azar, dos individuos que provengan de diferente especie, de acuerdo a la expresión

$$\hat{D} = \sum_{i=1}^s p_i$$

Con

p_i = proporción de individuos de la especie i en la comunidad

$1 - \hat{D}$ = Probabilidad de extraer dos individuos seleccionados al azar que sean de la misma especie para obtener la heterogeneidad observada

Ajusco

Se obtuvo

$$\hat{D} = 0.878^2 + 0.035^2 + \dots + 0.002^2$$

$$\hat{D} = 0.7771$$

Con $1 - \hat{D} = 0.2228$ como la probabilidad de extraer dos individuos que sean de diferente especie.

Para obtener la heterogeneidad observada en el Ajusco, se requeriría:

$$\frac{1}{\hat{D}} = \frac{1}{0.7771}$$

$$\frac{1}{\hat{D}} = 4.488 \text{ especies}$$

Zoquiapan

Con el índice de Simpson

$$\hat{D} = 0.848^2 + 0.035^2 + \dots + 0.0007^2$$

$$\hat{D} = 0.7345$$

La probabilidad de que 2 individuos sean de diferente especie es

$$1 - \hat{D} = 0.2654$$

Para obtener el valor de heterogeneidad observado en esta localidad, se necesitarían:

$$\frac{1}{\hat{D}} = 3.7669 \text{ especies}$$

Al estimar el índice de Simpson, se observó que la probabilidad de obtener dos descortezadores de pino de distinta especie para una muestra determinada, es ligeramente mayor en El Parque Nacional de Zoquiapan, fundamentalmente porque esta medida de diversidad considera en el análisis a las especies más comunes; las cuales fueron considerablemente más abundantes en Zoquiapan que en el Ajusco.

En ambas localidades la especie dominante fue la misma (*Ips bonanseai*), que presentó una abundancia proporcional muy parecida en los dos sitios; no obstante, se requiere un muestreo más intensivo para obtener un mayor número de ejemplares y realizar un análisis de diversidad más completo. Respecto a las curvas de abundancia de especies, se apreció un comportamiento equivalente en ambas localidades; sin embargo el número de ejemplares colectados en Zoquiapan fue mucho mayor; esta gran diferencia numérica puede atribuirse a errores en la técnica de muestreo, como son: la diferencia temporal al realizar los derribos de cada sitio y al manejo de las muestras, así como al efecto de la actividad humana en el Ajusco, localidad donde se registraron menos individuos. La lista de especies colectadas en cada área de estudio, así como la obtenida mediante revisión literaria, se anexan como apéndices.

6. DISCUSIÓN

Las diferencias observadas en el vigor entre ambas localidades pueden ser atribuidas, a la intensidad de las actividades humanas en el área. Es decir, Ajusco, por su fácil acceso, se encuentra sometido a una mayor presión por parte de los turistas y los comuneros, estos últimos constantemente realizan prácticas inadecuadas de extracción de madera clandestina, podas inapropiadas para el paso del ganado, fogatas y cacería. El resultado ha sido una pérdida gradual de la cobertura vegetal, además de la continua deformación de los árboles por las heridas causadas en las podas y la depositación de material incendiable sobre el suelo. A lo anterior, se suma el efecto de la contaminación ambiental que es mayor en esta zona por su orientación respecto a la ciudad de México. Todos estos factores, en conjunto, impiden la recuperación del bosque y aceleran la pérdida de las áreas forestales.

En Zoquiapan, aunque también existe la tala y la cacería clandestina, las presiones que sufre por efecto de las actividades humanas son menores y las prácticas de poda para el paso del ganado no son frecuentes, en su lugar se recurre a la quema de pastizales en áreas abiertas o en claros con regeneración natural, en este último caso el daño es principalmente en los brinzales.

La situación de ambos bosques es difícil, en especial por estar en un proceso de reducción de vigor que afecta su tasa de regeneración. A todo lo anterior se suma el efecto del acarreo de contaminantes provenientes de la ciudad de México, que se depositan principalmente en las cañadas ubicadas al sur de la misma, donde se localizan los bosques de interfase. Bajo estas condiciones se tiende a la pérdida de este recurso, que es necesario recuperar por diversos motivos de carácter social, económico y ecológico; por lo que es prioritario establecer planes de manejo de estas áreas que incluyan un programa de educación ambiental para sensibilizar a la población sobre las medidas preventivas y de control, necesarias para la recuperación de los bosques que rodean a la ciudad de México.

7. CONCLUSIONES

Como conclusión general, se encontró que existen diferencias estadísticas significativas en la salud forestal de las dos áreas de estudio. La comparación entre la salud forestal de los rodales de cada sitio, mostró que la densidad de individuos y la altitud no influyeron en esta comparación, por lo que se debe considerar la participación de otros factores que afectan el vigor del arbolado.

1. De las 12 variables analizadas, las mejores variables predictivas de la salud forestal fueron: **el color de la copa, la forma de la punta, la conformación del fuste y la retención de follaje**. En Zoquiapan, además de las variables anteriores, se seleccionó a **la infección de muérdago y al daño en las hojas**.

2. De entre las variables seleccionadas, se encontró que existen diferencias estadísticas en las dos localidades para las variables: **el color de la copa, la forma de la punta, la conformación del fuste, la infección de muérdago y daño en las hojas**. Para **la retención del follaje** no se encontraron diferencias estadísticas entre las dos áreas de estudio.

3. **El daño en las hojas** fue estadísticamente diferente en cada sitio. Las lesiones en la acícula que se observaron con más frecuencia, fueron de intensidad media en el **47.4%** de los árboles de Zoquiapan y en el **41.4%** de los árboles de Ajusco. El daño foliar identificado como muy severo, afectó al **0.1%** y al **0.9%** de los árboles de Zoquiapan y Ajusco, respectivamente.

4. Para el **color del follaje**, se encontraron diferencias estadísticas entre las dos áreas de estudio. En Zoquiapan, el **9.9%** de los árboles tuvo follaje de color **verde intenso**; en contraste, en Ajusco solo el **2.2%** de los árboles tuvieron esta clase de color. En Zoquiapan, el porcentaje de árboles con follaje de color **verde claro y verde limón** fue del **33.8%** y del **31.14%**, respectivamente; en Ajusco, dominaron el **verde amarillo y el verde limón**, con cifras correspondientes de **37.2%** y **26.9%**.

5. Con respecto a la **longitud del follaje**, se determinó que estadísticamente existen diferencias en el largo de las hojas de las dos localidades. En promedio, las hojas fueron más largas en Zoquiapan, con una media de **14.5 cm**; en Ajusco, la media fue de **10.28 cm** de largo.

6. La **condición de la punta** resultó estadísticamente distinta en Ajusco y Zoquiapan. El **4.2%** de los árboles de Ajusco tuvo daños en la punta; en contraste, en Zoquiapan, solo el **1.2%** de los árboles presentó este tipo de daño. En Zoquiapan, el **75%** de los árboles tuvo punta en crecimiento; mientras que en Ajusco el **60.9%** de los árboles tuvo esta característica.

7. Respecto a la **conformación del fuste**, se estableció que las dos localidades son estadísticamente diferentes. En Zoquiapan, los fustes bifurcados y polifurcados ocuparon el **19.8%** de la muestra. En Ajusco, el **60.1%** de los árboles tuvieron fustes deformes.

8. En Zoquiapan, la **infección de muérdago enano** se asocia frecuentemente con la pérdida de follaje y la ruptura de las puntas. Se concluyó que esta planta parásita es uno de los factores relacionados con la disminución del vigor del arbolado. Los árboles estudiados en Ajusco no tuvieron infección de esta planta parásita.

9. Para la **altura** de los árboles, se encontraron diferencias estadísticas entre ambas localidades. En general los árboles fueron más altos en Zoquiapan donde se obtuvo una media de **3.74 m** mientras que en Ajusco fue de **2.24 m**. En Zoquiapan se observó una mayor variabilidad en la muestra; el coeficiente de variación en altura fue mayor en esta localidad, donde obtuvo un valor del **58.2%**, mientras que en el Ajusco fue del **40.46%**.

10. Con respecto al **diámetro normal** del arbolado, se encontró que hay diferencias significativas entre los dos sitios. El diámetro promedio fue de **6.8 cm** en Zoquiapan y de **6.29 cm** en Ajusco

11. La edad promedio en Ajusco fue de **23.52 años** y en Zoquiapan fue de **22.27 años**. La tasa de crecimiento en escala logarítmica; de acuerdo a la ecuación $\text{Ln}(\text{alt}) = \beta_0 + \beta_1 \text{Ln}(\text{edad})$, fue de **1.055** en Zoquiapan y de **0.828** en el Ajusco; por lo que se determinó que el crecimiento es más rápido en la primera localidad.

12. Respecto al **índice de Shannon-Weaver**, que se utilizó para estimar la diversidad de insectos descórtzadores de *Pinus hartwegii*, no se encontraron diferencias estadísticas entre ambas localidades. En total, en Zoquiapan se colectaron **3067 insectos** descortezadores distribuidos en **13 especies**; mientras que en Ajusco, se obtuvo una muestra de **507 individuos y 14 especies**. En los dos sitios, la especie dominante de insecto fue *Ips bonanseai*.

13. La **retención de follaje** fue similar en ambas localidades. El porcentaje de árboles que conservó de la mitad a tres cuartas partes de su follaje, fue del **50.0%** en Zoquiapan y del **53.8%** en Ajusco. Respecto a los árboles con copa rala, el **5.6%** y el **7.6%** de los árboles de la muestra presentó esta característica en Zoquiapan y Ajusco, respectivamente. El porcentaje de árboles que conservó más de tres cuartas partes de su follaje, fue del **8.1%** en Zoquiapan y del **6.8%** en Ajusco. Estadísticamente no se encontró diferencia significativa en la retención del follaje de las dos localidades. Con respecto a la **retención del follaje**, se requiere realizar una categorización más precisa, basada únicamente en el número de años que conserva el árbol sus hojas. En este trabajo, para calificar la retención del follaje, se utilizó una escala que combinaba el número de años con la transparencia del follaje, lo que ocasionó confusión al calificar a cada árbol individual y ambigüedad en los resultados.

14. Finalmente, se concluyó que en Zoquiapan prevalece una mejor calidad ambiental, lo que implica que la salud forestal de los árboles de la especie: *Pinus hartwegii*, es más elevada.

8. RECOMENDACIONES

Finalmente, al realizar un estudio similar al aquí expuesto, se dan los siguientes puntos que deben ser tomados en consideración al iniciar un estudio de esta naturaleza:

- Se requiere realizar una categorización más fina de algunas variables, de tal forma que esta clasificación contenga un mayor número de clases. Las variables para las cuales que se recomienda redefinir las categorías son: **retención de follaje, forma de la punta y conformación del fuste**, que necesitan un mayor número de clases para incluir aquellos casos observados en el campo que pudieran caer entre dos categorías. Un aspecto fundamental es que al tener un mayor número de clases es posible efectuar una selección más precisa de las variables predictivas, siempre y cuando las variables bajo estudio así lo permitan.
- Es necesario tomar muestras de suelo para identificar y descartar posibles factores causales del análisis. Esta información enriquece los resultados y permite buscar las asociaciones que existen entre las condiciones del sitio y el estado sanitario de la vegetación.
- Incluir muestras de la raíz de algunos de los árboles del área en estudio e inspeccionarlas para ver si existen patógenos asociados al sistema radicular. En caso de que existan, esta información idealmente debería de incluirse en los análisis.
- Realizar cortes histológicos en las hojas para identificar los daños por contaminantes o por deficiencias nutrimentales, en este último caso se deben de tomar muestras de suelo y efectuar análisis químicos para determinar las concentraciones de nutrimentos presentes en el suelo. Además, en el caso de los contaminantes, es importante obtener información sobre su concentración y variación estacionales para identificar su efecto en la vegetación.

- Se deben buscar las asociaciones existentes entre las variables analizadas, sean o no cuantitativas, con el fin de observar si hay alguna relación entre ellas, como la que podría haber entre la longitud del follaje y la intensidad de daño en la acícula, por ejemplo; aunque existen otras asociaciones posibles que podrían ayudar en la interpretación de la calidad ambiental de un área forestal.
- Al desarrollar un trabajo de esta índole, se deben considerar los estudios previos que existan sobre la región para evitar duplicar esfuerzos e incluir en el tratamiento de los datos esta información; en caso de existir modelos predictivos estos deben de ser utilizados para detectar los cambios que ha presentado la zona desde el estudio anterior.
- Idealmente, la toma de datos debería de acoplarse a las variaciones estacionales para detectar los cambios de la vegetación y buscar las posibles asociaciones entre las variables y los factores ambientales (por ejemplo, los punteados cloróticos por daños de ozono pueden ser más frecuentes en los meses de inversión térmica que en el resto del año). Esta recomendación es muy útil cuando se desean desarrollar modelos predictivos de la salud forestal o para el establecimiento de programas de recuperación de la zona.
- Se deben de establecer regiones testigo donde existan condiciones ambientales equivalentes a las de la zona en estudio pero con una mejor calidad ambiental, de tal forma que los resultados del trabajo puedan ser contrastados con las observaciones registradas en estas áreas, con el propósito de comparar el estado fitosanitario de la vegetación entre ambas regiones.

9. LITERATURA CITADA

1. Alexander, S.A.; M. Baldwin; W.A. Bechtold; D.L. Cassell; S. Cline; T. Droessler; J.W. Hazard; J.G. Isebrands; V.J. Labau; K.H. Riitters; H. Schreuder; S.J. Steele y M.S. Williams. 1993. Forest health monitoring 1991: Georgia indicator evaluation and field study. EPA/620/R-94/007. U.S. EPA Environmental Research Laboratory, Corvallis, OR.
2. Alvarado R.,D. 1989. Declinación y muerte del bosque de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del valle de México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.
3. Arechiga A.,G.; A. Gutiérrez L. y J .Villa C. 1997. Impacto de los escarabajos descortezadores sobre la estructura del bosque de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Nevado de Colima. Memorias del IX Simposio Nacinal sobre Parasitología Forestal, Universidad Autónoma Antonio Narro, Cohahuila. México
4. Atkinson, T.H. y A. Equihua M.1985. Lista comentada de los coleopteros scolytidae y platypodidae del Valle de México. Folia Entomológica Mexicana No. 65:63-108
5. Baéz P., A. 1989. Lluvia ácida, una realidad. Ciencia y Desarrollo vol xv núm. 87: 41-47.
6. Barnet, V. y K.F. Turkaman 1995. Statistics for the environment. John Wiley and Sons. USA.
7. Bartuska, A.M. 1996. Federal agency perspective or a forest health program for the 21st century in: Proc. North American Forest Insects Work Conference, Texas Forest Service Publication 160.
8. Bartuska, A.M. 1996. Forest health for a healthy nation: a forest service perspective on ecosystem management, in: Proc.North American Forest Insects Work Conference, Texas Forest Service Publication 160.
9. Bauer L.I. 1972. Uso de plantas indicadoras de aeropolutos en la Ciudad de México. Agrociencia 9:139-141. México.
10. Bauer L.I. y T.Hernández. 1986. Contaminación: una amenaza para la vegetación en México. Colegio de Postgraduados, Centro de Fitopatología. México.

11. Bennet, D.P. y D.A. Humphries 1974. Introduction to field Biology. 2nd. Ed. Edward Arnold Eds, U.K.
12. Blanco Z.,S.; G. Ceballos G.; C. Galindo L.; M. Mass.; R. Patrón S.; A. Pescador y A. Suarez 1981. Ecología de la Estación Experimental Zoquiapan. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
13. Brower, J.E.; J.H. Zar y G.N. Von ende 1990. Field and Laboratory Methods for General Ecology. W. C. Brown Publishers, USA.
14. Bruck, R.I. 1989. Forest decline syndromes in the Southeastern United States. In: Air pollution's toll on forest and crops. Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. (eds.) Yale Press University, New Haven and London.
15. CFS(1) 1996. Climate change network. Natural Resource Canada. Canadian Forest Service Science and Tecnology Networks, November.
16. CFS(2) 1996. Effects of forestry practices network. Natural Resource Canada. Canadian Forest Service Science and Tecnology Networks, November
17. CFS(3) 1996. Forest biodiversity network. Natural Resource Canada. Canadian Forest Service Science and Tecnology Networks, November.
18. CFS(4) 1996. Forest health network. Natural Resource Canada. Canadian Forest Service Science and Tecnology Networks, November.
19. CFS(5) 1996. Lanscape management network. Natural Resource Canada. Canadian Forest Service Science and Tecnology Networks, November.
20. Cibrián T., D. 1988. Air pollution and forest decline near Mexico city. Environmental Monitoring and assesment 12 :49-58.
21. Cibrián T., D. 1991. Declinación de pinos en el Ejido "Los Sauces", Amanalco, Edo. de Méx. Informe técnico. Probosque. Estado de México, México.
22. Cielsa, W.M. y G. Hildebrand 1986. Forest decline inventory methods in West Germany oppotunities for application in North America. USDA. Forest Service Report No.86-3
23. Cielsa, W.M. y S.Macias E. 1987. Desierto de los Leones. A forest in crisis. American Forest, November/December.
24. Conover, W.J. 1980. Practical noparametric statistics. 2nd John Wiley and Sons.

25. Chesnut, L.G. y R.D. Rowe. 1989. Economic measures of the impacts of air pollution on health and visibility. In: Air pollution's toll on forest and crops. Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. (eds.) Yale Press University, New Haven and London.
26. Dunning, D. 1928. A tree classification for the selection forests en the Sierra Nevada. Journal of Agricultural Research 36(9):755-771.
27. EPA 1994. Report of the Interagency Biological Methods Workshop. U.S. Geological Survey, USA.
28. Equihua M., A. y A. Burgos-Solorio. 1993. Notas sobre la distribución de Scolytidae (Coleoptera) de México y el sur de Texas (EUA). Agrociencia serie Protección Vegetal Vol. 4 (3):305-318.
29. Espinosa R., G.; C.Y. Dominguez R. y N.N. Hernández Grupo Editorial Iberoamérica, México. 1985. Evaluación del daño causado por descortezadores en tres zonas del Ajusco. Universidad Autónoma Metropolitana, México.
30. Espinoza C.,G. y A. Muñoz M. 1988. Sistema de clasificación de riesgo para *Dendroctonus mexicanus* Hopk. en los bosques de la UIEF San Rafael, México. Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo, México.
31. Ferrell, G.T. 1980. Risk-rating systems for mature red fir and white fir in Northern California. USDA For. Ser. Pacific Southwest For. Range Exp. Stn. Gen. Tech. Rep. PSW-39.
32. Ferrell, G.T. 1986. Using indicator plants to asses susceptibility of California red fir and white fir to the fir engraver beetle. USDA For. Ser. Pacific Southwest For. Range Exp. Stn. Res. Note PSW-388, Berkeley, California. 5 p.
33. Fostad, O. y P.A. Pedersen 1997. Vitality, variation and causes of decline of trees in Oslo (Norway). Jour. Arboriculture, Vol 23 (4):155-165
34. Gleason, M.L.; S.K. Parker; T.E. Engle; P.H. Flynn; H.M. Griffiths; M.A. Vithos y J.K. Iles 1997. Ash yellows occurence and association with slow growth of green ash in Iowa and Wisconsin cities. Jour. Arboriculture, Vol 23 (2):77-82.
35. Graham, S.A. 1929. Principles of forest entomology. McGraw-Hill Book Company, Inc.
36. Graham, S.A. 1952. Forest entomology. McGraw-Hill Book Company, Inc.

37. Guderian, R.; K.H. Becker; W.F. Fricke; J. Lobel; R. Rabe; U. Schurath y D.T. Tingey 1985. Air pollution by photochemical oxidants: formation, transport, control and effects on plants. R.Guderian (ed.) Springer-Verlag Berlin, Alemania.
38. Hamilton, D.A. y D.L.R. Wendt. 1975. SCREEN: a computer program to identify predictors of dichotomous dependent variables. USDA For. Ser. Gen. Tech. Rep. INT-22, Intermtn. For. Range Exp. Stn. Ogden, Utha. 20 p.
39. Hamilton, D.A. y B.M. Edwards 1976. Modeling the probability of individual tree mortality. USDA For. Ser. Res. Pap. INT--185. Intermtn. For. Range Exp. Stn. Ogden, Utha. 22 p.
40. Hamilton, D.A. 1988. SCREEN (F): A FORTRAN77 Program to identify predictors of dichotomous dependent variables. USDA For. Ser. Intermtn. For. Range Exp. Stn. Res. Note INT-383 Ogden, Utha. 4 p.
41. Hawksworth, F.G. 1977. The 6 class dwarf mistletoe rating system. USDA. FS.RM-48.
42. Heck, W.W. 1989. Assessment of crop losses from air pollutants in the United States. In: Air pollution's toll on forest and crops. (Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. Eds.) Yale Press University, New Haven and London.
43. Hellkamp, A.S.; J.M. Bay; K.N. Easterling, G.R. Hess; B.F. McQuaid; M.J. Munster; D.A. Neher; G.L. Olson; K. Sidik; L.A. Stefanski; M.B. Tooley y C.L. Campbell. 1995. Environmental monitoring and assessment program-agricultural lands pilot field program Report-1993. EPA/XXX/R-XX/XXX. USDA, Washington, DC.
44. Hernández R., A. 1995. Condiciones de vigor del arbolado de alineación de la Delegación Cuauhtémoc. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México.
45. Hernández T., T. 1981. Reconocimiento y evaluación del daño por gases oxidantes en pinos y avena del Ajusco, D.F. Tesis Profesional, Universidad Autónoma Chapingo, México.
46. Hernández T., T. 1984. Efecto de los gases oxidantes sobre algunas especies del género *Pinus* nativas del Valle de México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.

47. Hernández T.,T. y L.I. Bauer 1989. La supervivencia vegetal ante la contaminación atmosférica. Colegio de Postgraduados, México.
48. Heyer, W.R. ; M.A. Donnelly; R.W. McDiarmid; L.C. Hayek y M.S Foster 1994. Measuring and Monitoring Biological Diversity. Smithsonian Institution Press, USA.
49. Huettl, R.F. 1989. New types of forest damage in Central Europe. In: Air pollution's toll on forest and crops. Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. (eds.) Yale Press University, New Haven and London.
50. Innes, J.L.; J.P. Bohm; J.B. Bucher; M. Dobbertin; E.Jansen; P. Kull; A. Rigling; L.Walthert y S. Zimmermann. 1994. Sanasilva report 1993. Der Zustand des Schweizer Waldes. Ber. Eidgenoss.Forsch.anst.Wald Schnee Landsch, 339.
51. ITFM 1994. Water quality monitoring in the United States. Technical Appendixes. 1993 Report of the intergovernmental task force on monitoring water quality. U.S. Geological Survey. Water Data Coordination, Reston, VA.
52. Johnson, A.H. y T.G. Siccama. 1989. Decline of red spruce in the high elevation forests of the Northeastern United States. In: Air pollution's toll on forest and crops. (Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. Eds.) Yale Press University, New Haven and London.
53. Johnson, J.W.; M.L Gleason; S.K Parker; E.V Provin; J.K Iles y P.H Flynn 1997. Duration of water stress affects development of sphaeropsis canker on scots pine. Jour. Arboriculture, Vol 23 (2):72-76.
54. Johnson , R. 1991. Estadística elemental. Grupo Editorial Iberoamérica, México.
55. Katovich, S. y M. Mielke. 1993. How to manage Eastern white pine to minimize damage from blister rust and white pine weevil. USDA. Forest Service. Northeastern Area. NA-FR-01-93.
56. Keen, F.P. 1936. Relative susceptibility of the ponderosa pines to bark beetle attack. Journal Forestry 34(10):919-927.
57. Krebs, C.J. 1989. Ecological Methodology. Harper Collins Publishers.
58. Lewis, T.E. y B.L. Conkling (eds).1994. Forest health monitoring. Southeast loblolly/shortleaf pine demonstration interim report. EPA/620/R-94/006.U.S.Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

59. Llanderal O., T. 1995. Sistema de clasificación de susceptibilidad para *Dendroctonus frontalis* Zimm. en el Estado de México. Tesis. UACH, México.
60. López M., A. y R. Rivera 1995. Caracterización nutrimental del follaje de oyamel. Memorias del Colegio de Postgraduados, México.
61. Mackenzie, J.J. y M. El-Ashry 1989. Tree and crop injury : a summary of the evidence. In: Air pollution's toll on forest and crops. (Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. Eds.) Yale Press University, New Haven and London.
62. Magurran, A.E. 1989. Diversidad ecológica y su medición. Ediciones Vedral, España.
63. Manion, P.D. 1991. Tree disease concepts. 2nd ed. Prentice Hall.
64. Masera C., O. 1991. México y el cambio climático global. Ciencia y Desarrollo Vol XVII (100): 52-67.
65. Mason, G.N.; P.L. Lorio; R.P. Belanger y W.A. Nettleton. 1985. Rating susceptibility of stands to southern pine beetle attack. USDA. For. Ser. Cooperative State Research Service. Agriculture Handbook 645.
66. Messenger, A.S. y M.W. Stelford 1997. White pine chlorosis in northern Illinois: Iron deficiency or not ?. Jour. Arboriculture, Vol 23 (5):191-197.
67. Miller, P.R. 1989. Concept of forest decline in relation to Western U.S. forest. In: Air pollution's toll on forest and crops. (Mackenzie, J.J. y El-Ashry M. Eds.) Yale Press University, New Haven and London.
68. Mielke, M.E.; D.G. Soctomah; M.A. Marsden y W.M. Cielso 1986. Decline and mortality of red spruce in West Virginia. USDA., Forest Service, For. Pest Manag. Met. Appl. Group, Fort Collins Colorado Rep. No. 86
69. Mohan, V.A. 1988. El desafío de la lluvia ácida. Investigación y Ciencia, No. 145: 8-18.
70. Montgomery, D. C. 1991. Diseño de experimentos. Grupo Editorial Iberoamérica, México.
71. NAPAP 1993. Diagnosing injury to Eastern Forest trees. National Acid Precipitation Assessment Program. Forest Service Program. Vegetation Survey Research.

72. Ojeda T., R. 1991. Vegetación y medio ambiente en el área de influencia de la ciudad de México: problemas de contaminación. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, México.
73. Orozco T., F. 1997. Declinamiento del encino en el ejido "EL Arrayanal", Municipio de Minatitlan, Col. Memorias del IX Simposio Nacinal sobre Parasitología Forestal, Universidad Autónoma Antonio Narro, Cohahuila. México
74. Párama, V.M.; M.A. Guerrero; M.A. Morales; R. Morales y D. Baz C. 1987. Acidez de las precipitaciones en el Distrito Federal. Ciencia y Desarrollo No. 72: 59-65.
75. Paz E., D. 1989. Sistema de calificación de riesgo para estimar la muerte del oyamel (*Abies religiosa* Schl. et.Cham) en el Parque Desierto de Los Leones D.F. Tesis. UACH, México.
76. Paine, T.D.; F.M. Stephen y H.A. Taha 1984. Conceptual model of infestation probability based on bark beetle abundance and host tree susceptibility. Enviromental entomology 13:619-624.
77. Peck, S. Report on the insect indicator workshop. Held by the EMAP-Agroecosystem Resource Group o March 1 and 2, 1994. Raleigh, NC. (no publicado).
78. Pielou, E.C. 1975. Ecological diversity. Wiley Interscience Publication.
79. Pindyck, R.S. y D.L. Rubinfeld. 1991. Econometric models and economic forecast 3rd Ed. MacGraw Hill International Editions
80. Percival, G.C. y G.R.Dixon 1997. Detection of salt and waterlogging stresses in *Alnus cordata* by mesurement of leaf chlorophyll fluorescence. Jour. Arboriculture, Vol 23 (5):181-190.
81. Ramirez G., M. y Q. López T. 1993. Métodos estadísticos no paramétricos. Universidad Autónoma Chapingo, México.
82. Romero N., J.; S.A. Rosales; A. Equihua M. y H. Mejía G. 1997. Lista de Scolytidae y Platypodae de México (insecta: Coleoptera). Acta Zool. .Mex. (n.s.) 70:35-53.

83. Sánchez E., I.; V. Reyes Hernández, J.I. Jungo Chávez, J.M. Reyes Cisneros, E. Ojeda Sotelo y J. González De los Santos. 1995. Evaluación Dasométrica de Plantaciones de *Pinus spp.* en la Región de la Montaña, en el Estado de Guerrero, México. Informe de entrenamiento en campo, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
84. SAS Institute Inc. 1987. SAS/STAT Guide for personal computers. Release 6.03 edition. Cary, N.C.: SAS Institute Inc.
85. SAS Institute Inc. 1988. SAS Language guide for personal computers. Release 6.03 edition. Cary, N.C.: SAS Institute Inc.
86. Schreuder, H.T.; T.G. Gregoire y G.B. Wood. 1993. Sampling Methods for Multiresource Forest Inventory. John Wiley and Sons, N.Y., USA.
87. Siegel, S. 1986. Estadística no paramétrica. 10^{ma}. Edición. Editorial Trillas, México.
88. Smith, D.M. 1976. Changes in eastern forest since 1600 and posible effects in: Perspectives in forest entomology, (J.F. Anderson and H.K. Kaya)eds., Academic Press.
89. Solomon, J.D.; T.D. Leininger; A.D. Wilson; R.L. Anderson; L.C. Thompson y F.I. McCracken. 1993. Ash pest: A guide to major insects, diseases, air pollution injury and chemical injury. USDA. Forest Service. Southern Forest Experiment Station Gen. Tech. Rep. SO-96.
90. Sosa C., M. 1995. Monitoreo de impacto ambiental en áreas de bajo aprovechamiento forestal en el estado de Chihuahua, México. En : North America Workshop on Monitoring for Ecological Assessment of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Abstracts, September, Mexico.
91. Steel R., G. y J.H. Torrie 1981. Principles and procedures of statistics, a biometrical approach. 2nd ed. International Student Edition, McGraw Hill International Book Company.
92. Tainter, F.H. y F.A. Baker 1996. Principles of forest pathology. John Wiley and Sons, N.Y., USA.
93. UNAM 1993 . La vegetación urbana del campus universitario y la polémica del eucalipto. Programa de mejoramiento urbano de las áreas verdes del campus universitario, México.

94. USDA 1980. Hazard rating systems in forest insects pest management: Symposium proceeding. General technical report WO-27. Athenes, Georgia, July. USDA Forest Service.
95. USDA 1981. Stress triggered tree diseases : the diebacks and declines. USDA. Forest Service NE-INF-31-81.
96. USDA 1988. Evaluation of spruce and fir mortality in the Southern Appalachian Mountains. USDA. Forest Service. Southern Region. Protection Report R8-pr13, October.
97. USDA 1990. Air pollution and forest decline: Is there a link ? . USDA. Forest Service AIB-595.
98. USDA 1992. National forest healt monitoring. USDA. Forest Service. National Association of State Foresters. NA-TP-06-92.
99. USDA(1) 1993. Healthy forests for America's future: A strategic plan. USDA. Forest Service. MP-1513.
100. USDA(2) 1993. Pest risk assesment of the importation of *pinus radiata*, *Nothofagus dombeyi*, and *Laurelia philippiana* Logs from Chile. USDA. Forest Service. Miscellaneous Publication 1517.
101. USDA 1994. America's forest: 1994 health update. USDA. Forest Service. Agriculture Information Bulletin 696.
102. USDA 1996. California Forest Health : in 1994 and 1995. USDA. Forest Service. Pacific Southwest Region. R5-FPM-PR-002, December.
103. Walpole, R. E. y R.H. Myers. 1993. Probability ans statistics for engineers and scientists. 5th Mac Millan Publishing Company.
104. Wilson, R. 1991. Opening remarks. Proccedings, California Pest Council Annual Meeting: 2-4.
105. Woodwell, G.M. 1978. La cuestión del dióxido de carbono. Investigación y Ciencia No. 18: 16-26.
106. Zavala C., F. 1984. Sinecología de la Vegetación de la Estación de Enseñanza e Investigación Forestal Zoquiapan, Estados de México y Puebla. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. México.

10. APÉNDICE

1. Hoja de registro de los datos

HOJA DE REGISTRO DEL VIGOR PARA ARBOLES HASTA 9 m

Localidad : _____ sitio n° : _____ altitud : _____ msnm FECHA: _____

[illegible]

Fuste: $\cap$ doblado, $\int$ sinuoso, / inclinado, Y bifurcado, Ψ polifurcado

long: largo de la hoja (cm)

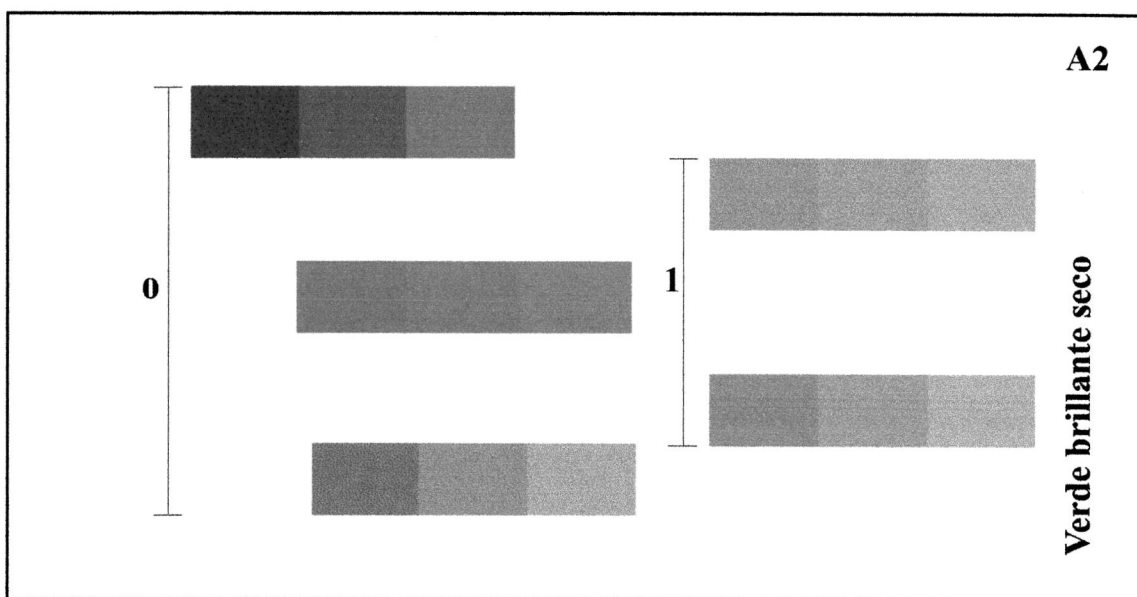
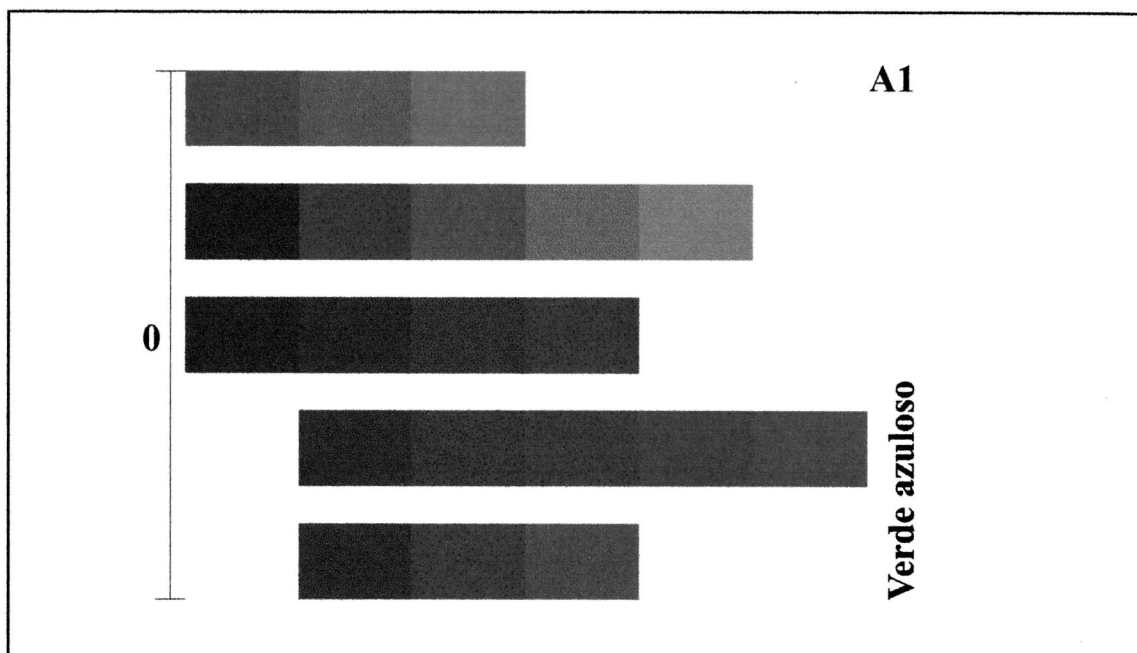
Punta: $\wedge, \cap, \Pi, \text{T truncada}$

* Para la edad usar taladro

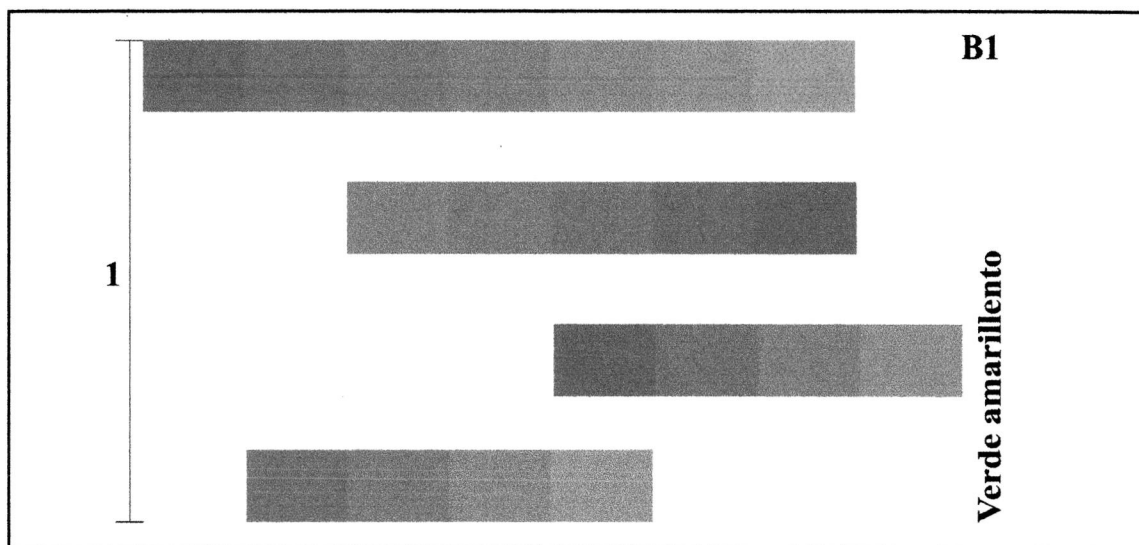
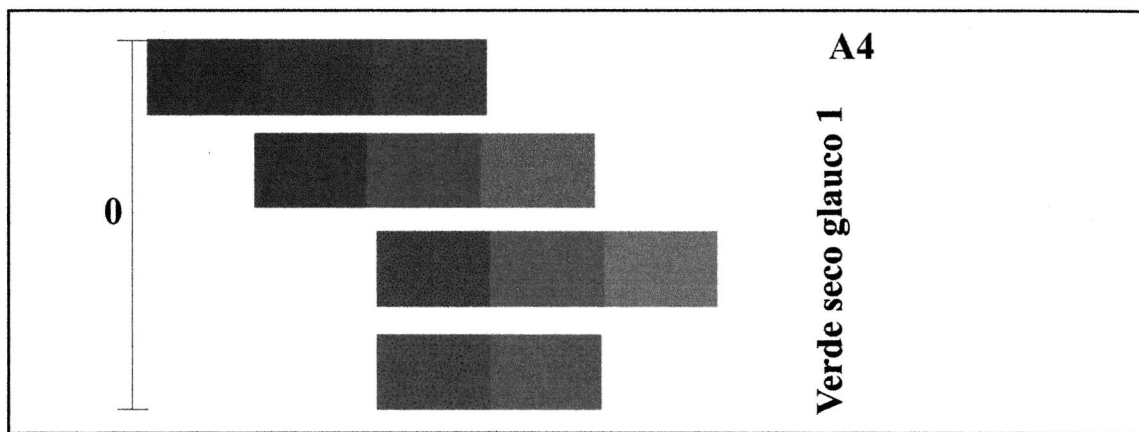
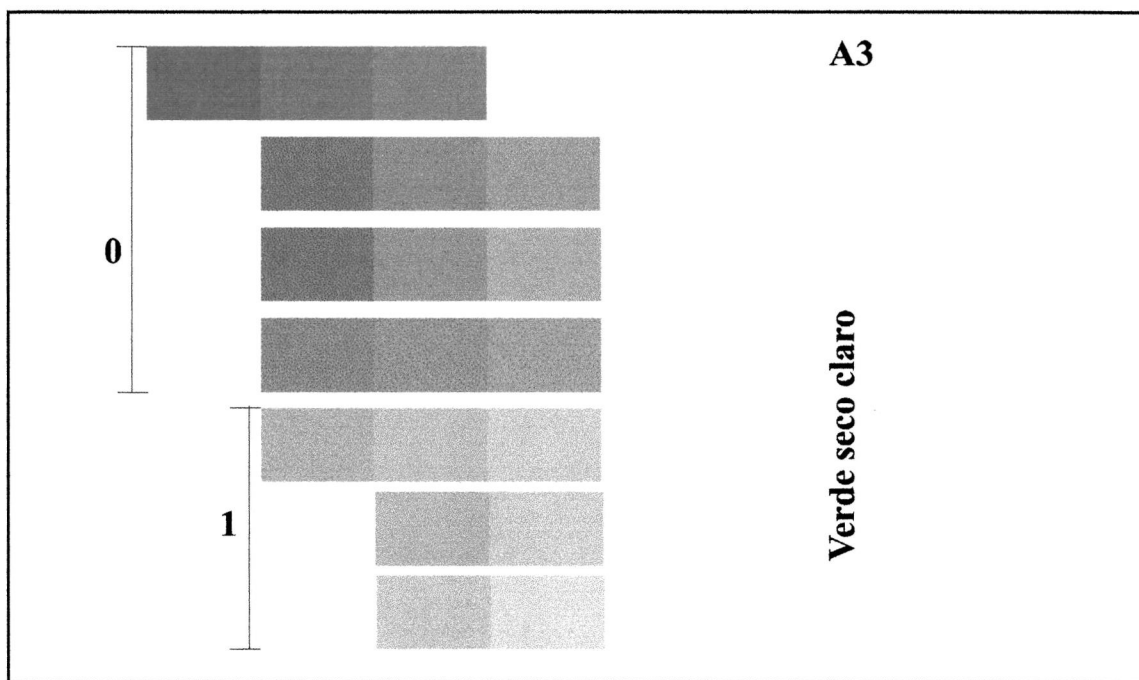
OBSERVACIONES: _____

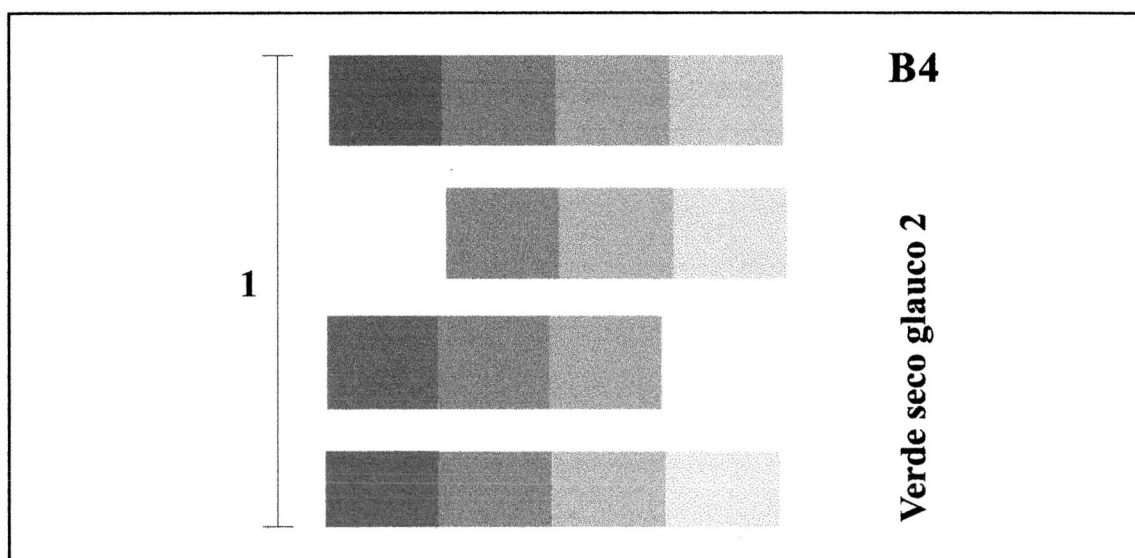
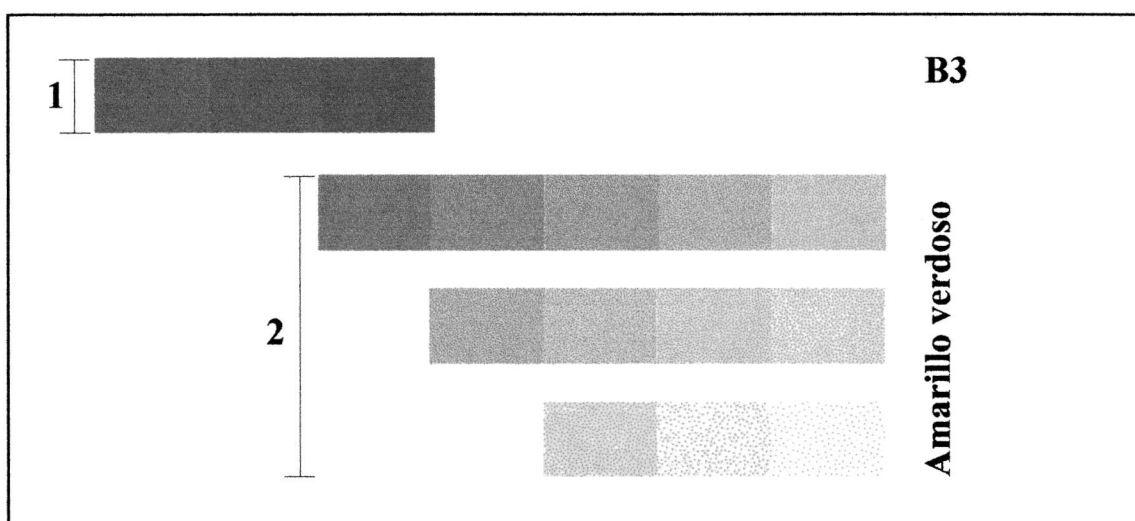
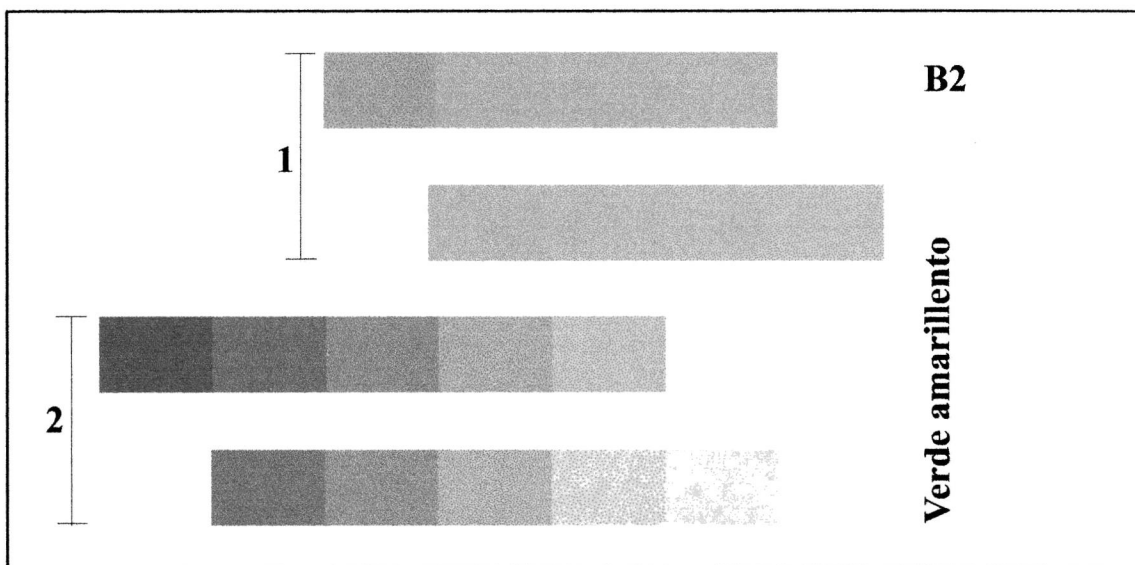
Hoja No. _____

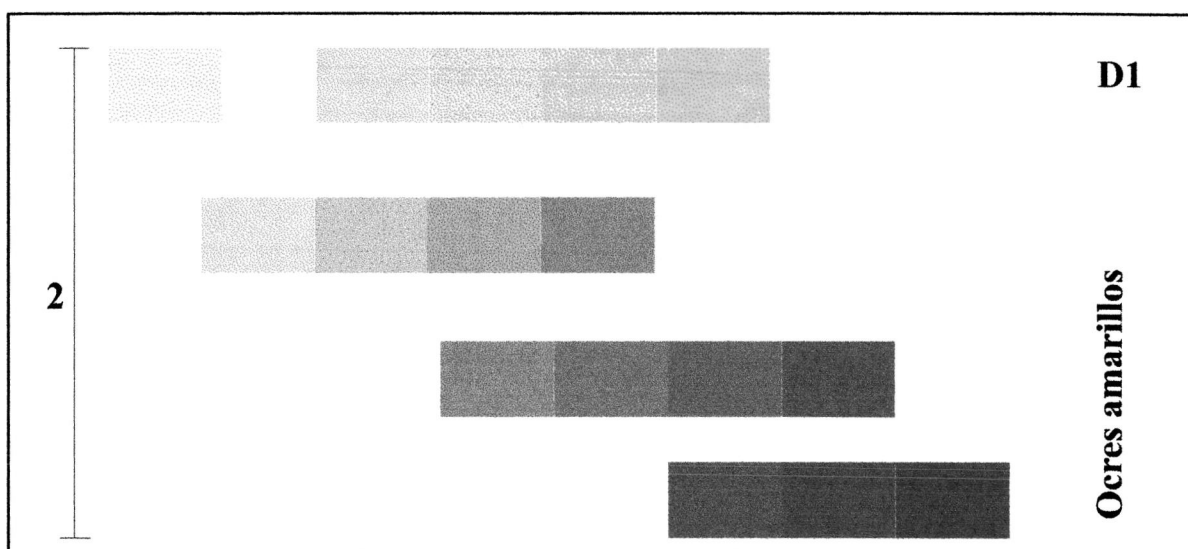
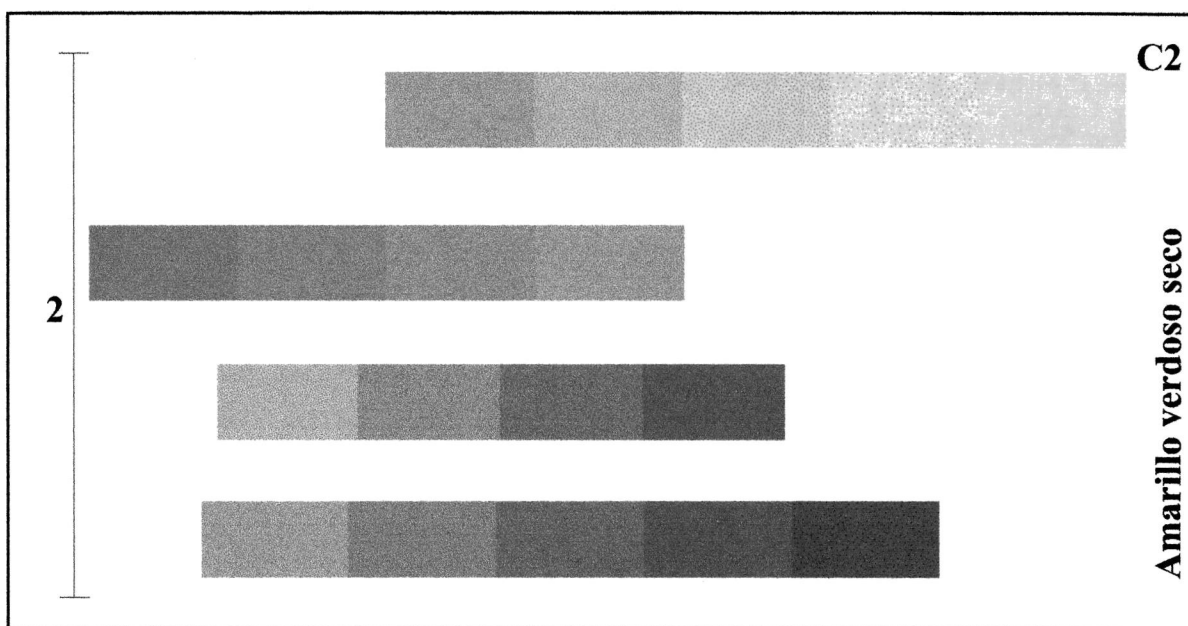
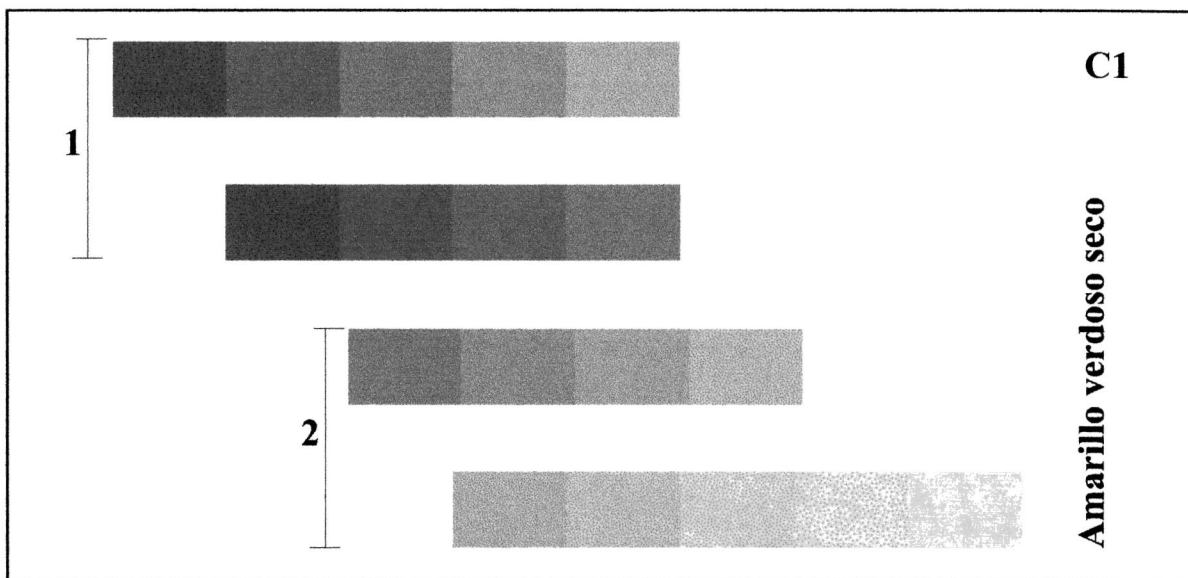
2. Tabla de colores para calificar el color del follaje de especies forestales.¹

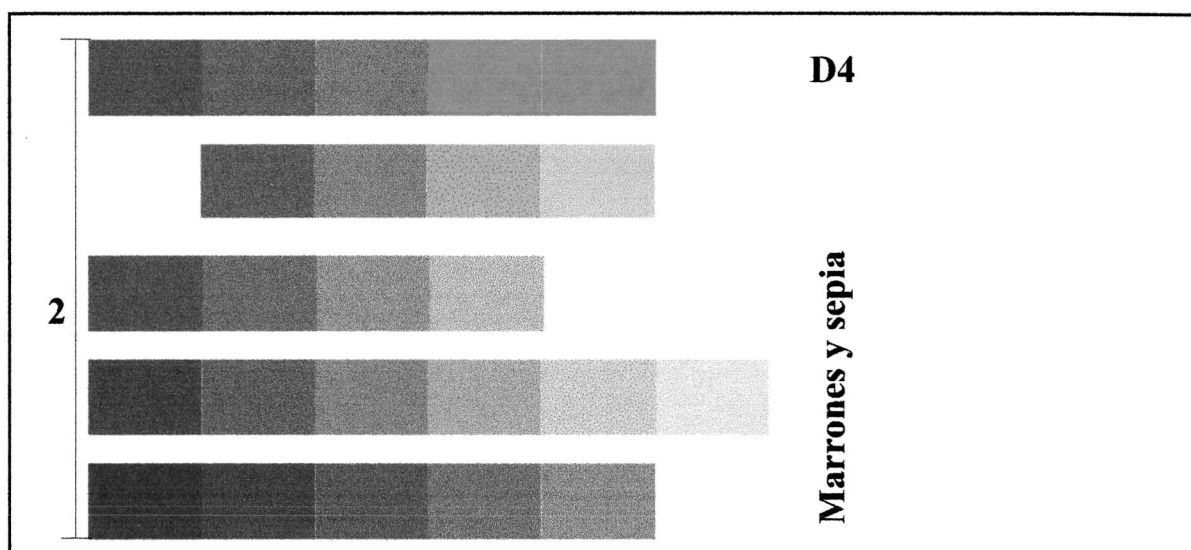
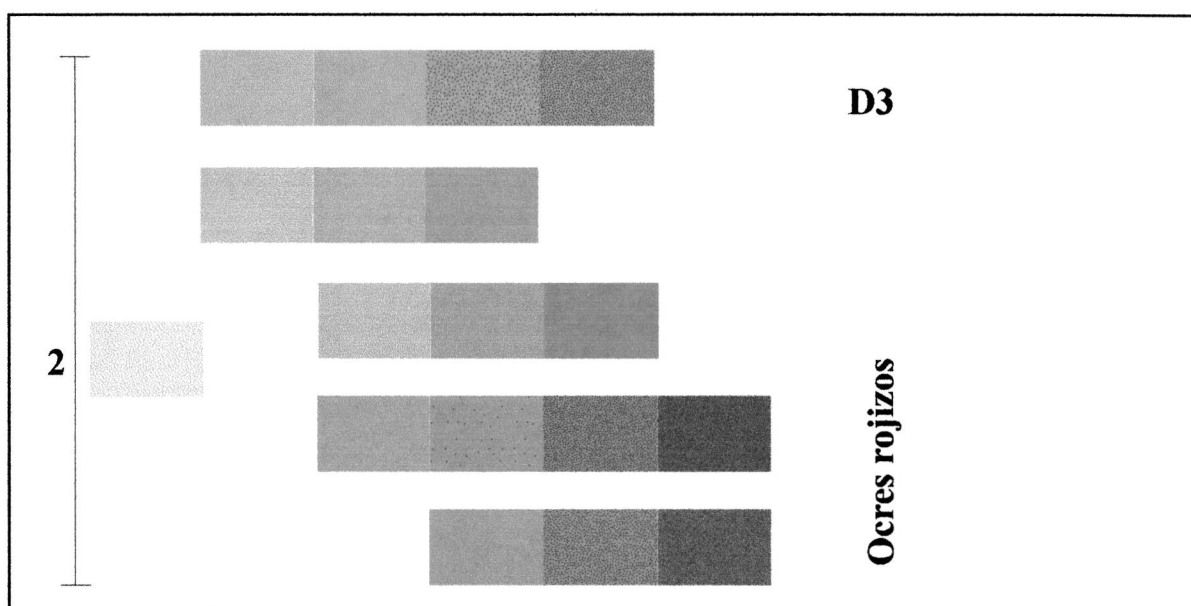
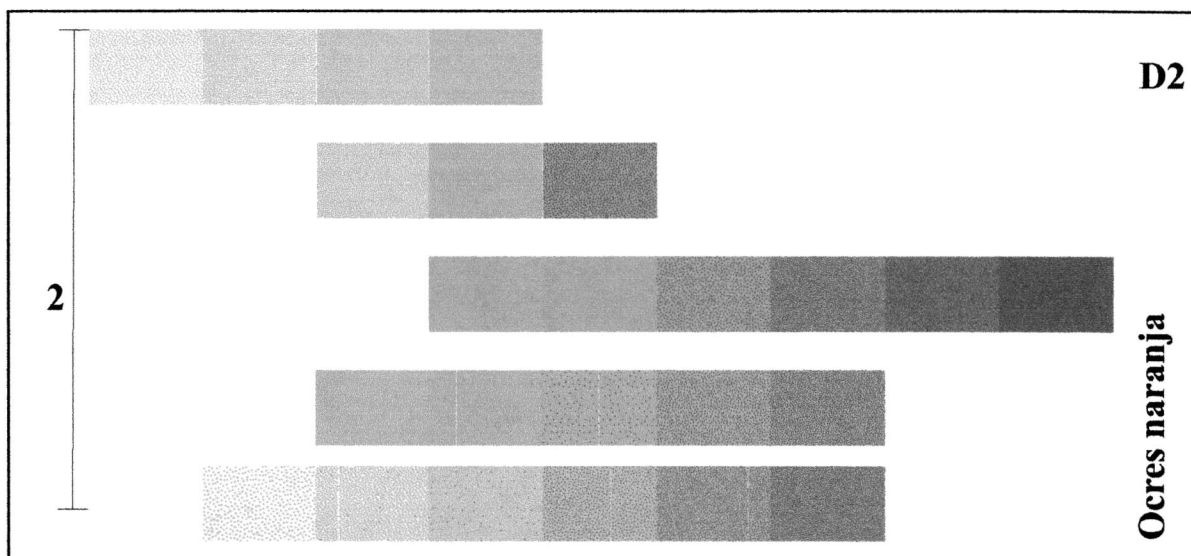


¹ Diseñada por Rebeca Eugenia González Medina, Leticia Arango C. y Rosalio Mejía V.









3. Tarjetas de control

Localidad: Ajusco

```

13      1118
1sitio      numrodal
8DAP        1 a 3   3 a 6   6 a 9   9 a 12  12 a 15  15 a 18  18 a 21 masde21
8ALT        menos 1 1 a 2   2 a 3   3 a 4   4 a 5   5 a 6   6 a 7   7 a 8
7color      intenso claro  limon  amaril  naranja rojizo  ocre
4hoja       buena  mala   pesima  fatal
4punta      viva   redonda trunca  muerta
4daño       menor25 25 a 50 50 a 75 mayor 75
8LONG.      mayor21 21 a 18 18 a 15 15 a 12 12 a 9  9 a 6   6 a 3   menor 3
2grado      presente ausente
6muerde     clase1  clase2  clase3  clase4  clase5  clase6
2callo      presente ausente
2vigor      sano   enfermo
4densid     baja   media  alta   elevada
1           1
12          8      0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
PRIMER CORRIDA: con todas las variables
1 1 1
12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
SEGUNDA CORRIDA: omitiendo hoja
1 11 1
12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
TERCER CORRIDA: sin color y hoja
1 111 1
12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
CUARTA CORRIDA: sin color, hoja y punta _

```

Localidad: Zoquiapan

13	867								
1sitio		numrodal							
8DAP		1 a 3	3 a 6	6 a 9	9 a 12	12 a 15	15 a 18	18 a 21	mas de 21
8ALT		menos 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	6 a 7	7 a 8
7color		intenso	claro	limon	amaril	naranja	rojizo	ocre	
4hoja		buena	mala	pesima	fatal				
4punta		viva	redonda	trunca	muerta				
4daño		menor 25	25 a 50	50 a 75	mayor 75				
8LONG.		mayor 21	21 a 18	18 a 15	15 a 12	12 a 9	9 a 6	6 a 3	menor 3
2grado		presente	ausente						
6muerde		clase1	clase2	clase3	clase4	clase5	clase6		
2callo		presente	ausente						
2vigor		sano	enfermo						
4densid		baja	media	alta	elevada				

1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

PRIMER CORRIDA: con todas las variables

1 1 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

SEGUNDA CORRIDA: sin variable hoja

1 11 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

TERCER CORRIDA: sin hoja y punta

1 11 1 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

CUARTA CORRIDA: sin hoja, punta y MUERDE

1 11 11 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

QUINTA CORRIDA: sin hoja, punta, color y muerde

1 111 11 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500

SEXTA CORRIDA: sin hoja, punta, muerde, grado y color_

Localidades: Ajusco y Zoquiapan

Análisis conjunto

13 1985

1sitio	numrodal
8DAP	1 a 3 3 a 6 6 a 9 9 a 12 12 a 15 15 a 18 18 a 21 mas de 21
8ALT	menos 1 1 a 2 2 a 3 3 a 4 4 a 5 5 a 6 6 a 7 7 a 8
7color	intenso claro limon amarillonaranja rojizo ocre
4hoja	excelentbuena regular pesima
4punta	viva redonda trunca muerta
4daño	menor 25 25 a 50 50 a 75 mayor 75
8LONG.	mayor 21 21 a 18 18 a 15 15 a 12 12 a 9 9 a 6 6 a 3 menor 3
2grado	presente ausente
6muerde	clase1 clase2 clase3 clase4 clase5 clase6
2callo	presente ausente
2vigor	sano enfermo
4densid	baja media alta elevada

1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
PRIMER CORRIDA: con todas las variables

1 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
SEGUNDA PRUEBA: omitiendo variable hoja

1 111 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
TERCER CORRIDA: sin color, hoja y punta

1 111 1 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
CUARTA CORRIDA: sin color, hoja, grado y punta

1 1111 1 1 12 8 0
3.84 5.99 7.81 9.49 11.1 12.6 14.1 9500
QUINTA CORRIDA: sin color, hoja, grado, daño y punta

4. Especies registradas en la zona de estudio

Lista de Scolytidae registrados en las colecciones del Valle de México para *Pinus hartwegii**. Las especies son listadas alfabeticamente.

Zoquiapan

Conophthorus ponderosae

Corthylus detrimmentosus

Hylocurus incomptus

Hylastes gracilis

Hylugpos longipennis

Hylugpos planirostris

Hylugpos subcostulatus

Dendroctonus approximatus

Dendroctonus valens

Dendroctonus adjunctus

Gnathotrichus nitidifrons

Gnathotrichus sulcatus

Gnathotrichus deleoni

Pityoborus hirtellus

Pityophthorus aztecus

Pityophthorus crassus

Pityophthorus cuspidatus

Pityophthorus furnissi

Pityophthorus segnis

Pityophthorus montezumae

Pityophthorus pubifrons

Ips bonanseai

Ips integer

Ips mexicanus

Ips grandicollis

Pityogenes mexicanus

Ajusco

Hylurgops longipennis

* Fuente de consulta: Base de Datos de la Colección Entomológica del Instituto de Fitosanidad, Colegio de Postgraduados; Colección de Insectos del Laboratorio de Entomología Forestal de la División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo; Espinosa *et al.* 1985; Atkinson T.H. y Equihua M.A. 1985; Equihua M.A. y A. Burgos-Solorio 1993; Romero *et al.* 1997.

Lista de Scolytidae descortezadores colectados en el estudio
(Orden: Coleoptera). Las especies son listadas en orden alfabético.

Zoquiapan

Dendroctonus adjunctus
Dendroctonus approximatus
Gnathotrichus deleoni
Gnathotrichus nitidifrons
Gnathotrichus sulcatus
Ips bonanseai
Ips mexicanus
Pityophthorus sp. 1
Pityophthorus sp. 2
Pityophthorus sp. 3 (P. furnissi)
Pityophthorus sp. 4
Pityophthorus sp. 5
Pityophthorus sp. 7 (P. aztecus)

Ajusco

Dendroctonus adjunctus
Gnathotrichus deleoni
Gnathotrichus nitidifrons
Gnathotrichus sulcatus
Hylurgops longipennis
Hylurgops planirostris
Ips bonanseai
Ips mexicanus
Ips integer
Pityophthorus sp. 1
Pityophthorus sp. 4
Pityophthorus sp. 5
Pityophthorus sp. 6
Pityophthorus sp. 7 (P. aztecus)

Complementariamente, se anexa una lista de algunos de los órdenes y familias de insectos no descortezadores que se encontraron entre el material biológico proveniente de cada localidad¹.

ORDENES Y FAMILIAS COLECTADAS POR LOCALIDAD		
Localidad:	Zoquiapan	Ajusco
Orden	Familia (los géneros aparecen en cursiva)	Familia
Coleoptera	Anobiidae Bostrychidae Cisidae Cleridae Curculionidae: <i>Lixus</i> Lyctidae: <i>Lyctus</i> Nitidulidae Ostomidae Mycetophilidae Staphilinidae	Cleridae Chrysomelidae Buprestidae Languriidae Lyctidae Silvanidae Staphilinidae Terevidae Ostomyiidae Platipodidae
Diptera	Anthomyiidae Cecidomyiidae Chyromiidae Dolichopodidae: <i>Medetera</i> Ephydriidae Sciaridae	Cecydomiidae Nitidulidae Pteromalidae Sciaridae Tenebrionidae
Hemiptera	Myridae	
Hymenoptera	Brachonidae Eupelmidae Ichneumonidae Pteromalidae Tenebrionidae	Eupelmidae Ichneumonidae
TOTAL	22	15

¹ Este material fue identificado por alumnos del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Por salir fuera del objetivo del presente trabajo no se incluyó en ninguno de los análisis realizados.

5. Programas para la estimación de la riqueza y abundancia de especies

PROGRAMA RAREFAC

```
C   J26/Feb/98  Revisiçn : 3-03-98  2:43:19 pm
C
C   Program RAREFACT  Version 1.0
C   Modified from Simberloff (1978)
C   Program by C. Krebs.
C   Adapted by A.Vazquez R.
C
C   This program calculates the expected number of species in
C   samples of N individuals, where N is specified by the user.
C
      PROGRAM RAREFACT
      PARAMETER (ND1=550,ND2=6000)
      DIMENSION NN(ND1),P(ND1),INTS(ND1)
      REAL*8 AFAC(ND2),X
      CHARACTER TEXT*72,FILEIN*12,FILEIO*12
      WRITE (*, '(' ENTER FILENAME FOR INPUT DATA-INSTRUCTIONS: '/') ')
      READ (*, '(A)') FILEIN
      WRITE (*, '(' ENTER FILENAME FOR OUTPUT STATISTICS: '/') ')
      READ (*, '(A)') FILEIO
      IN = 1
      IO = 2
      OPEN (UNIT=IN,FILE=FILEIN,STATUS='OLD')
      OPEN (UNIT=IO,FILE=FILEIO,STATUS='UNKNOWN')
      READ (IN,"(A72)") TEXT
      WRITE (IO,"(2X,A72)") TEXT
      READ (IN,*) ZN
      N = ZN
      WRITE (IO,"(2X,'Rarefaction method of species richness estimation'
&      //,2X,'Total number of individuals = ',I3)") N
      DO I = 1,N
        AFAC(1) = 0.0
        I4 = I + 1
        X = I4
        AFAC(I+1) = AFAC(I) + DLOG(X)
      END DO
      READ (IN,*) ZNS
      NS = ZNS
      READ (IN,*)
      READ (IN,*)
      WRITE (IO,"(2X,'Total number of species = ',I3)") NS
      WRITE (IO,"(2X,'Number of individuals in each species'
&      ' in any order per line.')" )
      DO I = 1,ND1
        READ (IN,*) X
        NN(I) = X
        WRITE (IO,"(2X,I3)") NN(I)
        LIM = I - 1
```

```

        IF (X < 0.01) GO TO 1
    END DO
1 IF (LIM == NS) GO TO 2
  WRITE (IO, "(2X, 'Error - No. species entered does not equal no. of'
    &      /2X, 'species specified earlier! check input! '/')")
  GO TO 8
C
C Sort species counts in descending order
C
2 READ (IN, *)
  READ (IN, *)
  READ (IN, *)
  L4 = NS - 1
  DO I = 1, L4
    I3 = NN(I)
    L3 = I + 1
    DO J = L3, NS
      IF (I3 < NN(J)) GO TO 3
      GO TO 4
3     NN(I) = NN(J)
      NN(J) = I3
      I3 = NN(I)
4     CONTINUE
    END DO
  END DO
  WRITE (IO, "(/2X, 'No. indiv. in each species in descending order'//
    &      (2X, 15I5))") (NN(I), I=1, NS)
  WRITE (IO, "(/2X, 'Values of N to obtain an estimate of No.'
    &      'species (up to 10 values).')")
  DO J = 1, 10
    READ (IN, *) INTS(J)
    IF (INTS(J) < 0) GO TO 5
  END DO
5 WRITE (IO, "(/2X, 'No. of', 8X, 'expected No.', 3X, 'Variance', 5X,
    &      'Standard'/2X, 'individuals', 3X, 'of species', 18X,
    &      'deviation'//)")
  DO L3 = 1, 10
    IF (INTS(L3) <= 0) GO TO 8
    M = INTS(L3)
    VAR = 0.0
    SM = 0.0
    DO I = 1, NS
      N3 = NN(I)
      IF (N-N3-M <= 0) GO TO 6
      P(I) = AFAC(N-N3) - AFAC(N-N3-M) + AFAC(N-M) - AFAC(N)
      P(I) = EXP(P(I))
      SM = SM + P(I)
      VAR = VAR + P(I) * (1.0 - P(I))
6     CONTINUE
    END DO
    L4 = NS - 1
    DO I = 1, L4
      K = I + 1
      DO J = K, NS
        N2 = NN(I)
        N3 = NN(J)
        P2 = 0.0

```

```

        IF (N-N2-N3-M <= 0) GO TO 7
        P2 = AFAC(N-N2-N3) - AFAC(N-N2-N3-M) + AFAC(N-M) - AFAC(N)
        P2 = EXP(P2)
        VAR = VAR + 2.0 * (P2 - P(I) * P(J))
7      CONTINUE
      END DO
    END DO
    X = NS
    SD = SQRT(VAR)
    SM = X - SM
    WRITE (IO,"(2X,I5,1X,3F15.4)") M,SM,VAR,SD
  END DO
8 WRITE (IO,"(/2X,'** ',' ','**')")
  STOP ' Programa Terminado'
END

```

PROGRAMA LOGSERIE

C M10/Mar/98 Revisi n : 3-04-98 8:08:19 pm

C

C Program LOGSERIE Versi n 1.0

C Programmed by C. Krebs in january 1987.

C Adapted by A.Vazquez R.

C

C This program calculates the parameters of the logarithmic series

C of Fisher, Corbet and Williams (1943) using table 146 and the

C recursive equation on page in Williams (1964).

C

PROGRAM LOGSERIE

PARAMETER (ND1=34,ND2=36,ND3=1000)

INTEGER ID(ND2)

REAL*8 TX(ND1),T(ND1),WH(ND3)

REAL*8 X,X2,Z,R,ALPHA,XN,Y9,CORR,SEI

DATA IND/'Y' /

DATA INC/'Y' /

DATA TX/0.5,0.6,0.7,0.8,0.85,0.9,0.91,0.92,0.93,0.94,0.95,0.96,
& 0.97,0.98,0.985,0.99,0.991,0.992,0.993,0.994,0.995,0.996
& ,0.997,0.998,0.999,0.9992,0.9994,0.9996,0.9998,0.9999,
& 0.99995,0.99999,0.999995,0.999999/
DATA T/1.443,1.637,1.938,2.483,2.987,3.909,4.198,4.551,4.995,
& 5.567,6.340,7.458,9.214,12.53,15.63,21.47,23.38,25.68,
& 28.58,32.38,37.48,45.11,57.21,80.33,144.6,175.1,224.5,
& 319.4,586.9,1086.,2020.,8696.,16390.,71430./

CHARACTER FILEIN*12,FILEIO*12

WRITE (*, '(" ENTER FILENAME FOR INPUT DATA-INSTRUCTIONS: "/") ')

READ (*, '(A) ') FILEIN

WRITE (*, '(" ENTER FILENAME FOR OUTPUT STATISTICS: "/") ')

READ (*, '(A) ') FILEIO

IN = 1

IO = 2

OPEN (UNIT=IN,FILE=FILEIN,STATUS='OLD')

OPEN (UNIT=IO,FILE=FILEIO,STATUS='UNKNOWN')

1 N = 0

DO I = 1,ND3

WH(I) = 0.0

END DO

WRITE (IO, "(2X, 'ENTER LABEL FOR DATA = ? ')")

READ (IN, '(36A2) ') ID

WRITE (IO, "(2X, 'ESTIMATION OF LOGARITHMIC SERIES PARAMETERS' /

& 4X, 'ENTER TOTAL NUMBER OF INDIVIDUALS IN SAMPLE = ? ')")

READ (IN, *) XN

WRITE (IO, "(4X, 'ENTER TOTAL NUMBER OF SPECIES IN SAMPLE = ? ')")

READ (IN, *) S

R = XN / S

C .. Get preliminary estimate of X from table 146.

DO I = 2,ND1

J = I - 1

IF (R < T(I)) GO TO 2

END DO

2 X = TX(J)

```

R = S / XN
3 X2 = 1.0 - X
N = N + 1
Z = (-X2 / X) * DLOG(X2)
IF (Z < R) GO TO 4
IF (N > 4000) GO TO 4
IF (X > 0.985) X = X + 0.000001
IF (X <= 0.985 .AND. X > 0.95) X = X + 0.00001
IF (X <= 0.95) X = X + 0.0001
GO TO 3
4 CONTINUE
WRITE (6, "(2X, 'ITERATION', I5, ' RIGTH SIDE = ', F12.6, ' S/N = ',
&      F12.6) ") N, Z, R
ALPHA = (XN * (1.0 - X)) / X
VAR = -ALPHA / (DLOG(1.0 - X))
WRITE (IO, "(/2X, '** ', 36A2, ' **/') ") ID
WRITE (IO, "(2X, 'LOGARITHMIC SERIES PARAMETERS'/5X, 'TOTAL INDIV',
&      'IDUALS = ', F12.0, /5X, 'TOTAL SPECIES = ', F9.0, /5X,
&      'ALPHA = ', F9.4, /5X, 'LARGE SAMPLE VARIANCE OF ALPHA FROM',
&      ' ANSCOMBE (1950) = ', F12.4, /5X, 'X = ', F10.7, /) ") XN, S, ALPHA
&      , VAR, X

```

C .. Theoretical Whittaker plot values.

```

WRITE (IO, "(4X, 'DO YOU WANT THE PREDICTED ABUNDANCES FOR A WHITTA'
&      , 'KER PLOT ? ', /5X, 'Type YES or NO.....') ")
READ (IN, '(A1)') INDEX
IF (INDEX /= IND .AND. INDEX /= INC) GO TO 10
C
ZZUM = 0.0
WRITE (IO, "(5X, 'THEORETICAL WHITTAKER PLOT OF SPECIES ABUNDANCES',
&      /10X, 'SPECIES RANK', 3X, 'NUMBER OF INDIVIDUAL', 5X,
&      'PROPORTIONS') ")
K = S
IF (XN < 500.0) XUMP = 1.0
IF (XN >= 500.0 .AND. XN < 1000.0) XUMP = 2.0
IF (XN >= 1000.0 .AND. XN < 2000.0) XUMP = 5.0
IF (XN > 2000.0) XUMP = 10.0
Y9 = DLOG (1.0 + (ALPHA / XN))
DO I = 1, K
  X = I
  X3 = XN / (X + 1.0)
  X3 = AINT (X3)
  N8 = 0
  I45 = 1
  I47 = 0
5  Y = X3 * Y9
  IF (I47 == I45) GO TO 9
  IF (X3 < 300.0) XUMP = 0.1
  IF (X3 >= 300.0 .AND. X3 < 500.0) XUMP = 1.0
  IF (X3 >= 500.0 .AND. X3 < 1000.0) XUMP = 2.0
  IF (X3 >= 1000.0 .AND. X3 < 2000.0) XUMP = 5.0
  IF (X3 > 2000.0) XUMP = 10.0
  Z2 = ALPHA * SEI(Y)
  N8 = N8 + 1
  D = Z2 - X
  IF (N8 > 3000) GO TO 9
  IF (D > 0.001) GO TO 6

```

```

        IF (D < -0.001) GO TO 7
        GO TO 9
6      X3 = X3 + XUMP
        I45 = 99
        GO TO 5
7      IF (X3 - XUMP > 0.0) GO TO 8
        GO TO 9
8      I47 = 99
        X3 = X3 - XUMP
        GO TO 5
9      CONTINUE
        X3 = X3 - XUMP
        WH(I) = X3
    END DO
    SUM = 0.0
    DO I = 1,K
        SUM = SUM + WH(I)
    END DO
    CORR = XN / SUM
    DO I = 1,K
        WH(I) = WH(I) * CORR
        Z6 = WH(I) / XN
        WRITE (IO, '(10X,I8,5X,F12.3,5X,F12.5)') I,WH(I),Z6
    END DO
    WRITE (IO, '(/3X)')
10  WRITE (IO, "(2X,'ANOTHER PROBLEM ? Type YES or NO.....')")
    READ (IN, '(A1)') INDEX
    IF (INDEX == IND .OR. INDEX == INC) GO TO 1
    STOP ' Programa Terminado.'
    END

```

```

REAL*8 FUNCTION SEI (X)

```

C
C Standard exponential integral Function.
C Aproximation formulae from ABRAMOWITZ and STEGUN (1964) CHAP. 5
C

```

REAL*8 A,A1,A2,A3,A4,A5,AA,AB,B1,B2,Z
DATA A,A1,A2,A3,A4,A5/-0.57721566,0.99999193,-0.24991055,
&          0.05519968,-0.00976004,0.00107857/
DATA AA,AB,B1,B2/2.334733,0.250621,3.330657,1.681534/
Z = X
SEI = 0.0
IF (Z > 0.0 .AND. Z <= 1.0) THEN
    SEI = -DLOG (Z) + A + A1 * Z + A2 * Z * Z + A3 * Z * Z * Z
&      + A4 * Z * Z * Z * Z + A5 * Z * Z * Z * Z * Z
END IF
IF (Z > 1.0) THEN
    SEI = (1.0 / (Z * DEXP (Z))) * ((Z * Z) + (AA * Z) + AB)
&      / ((Z * Z) + (B1 * Z) + B2)
END IF
RETURN
END

```