

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



TESIS

**DIVERSIDAD ESTRUCTURAL DE UN ECOSISTEMA FORESTAL EN LA
SIERRA MADRE OCCIDENTAL DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO**

POR

M.C. GABRIEL GRACIANO ÁVILA

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE
RECURSOS NATURALES**

ENERO, 2019

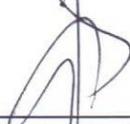
DIVERSIDAD ESTRUCTURAL DE UN ECOSISTEMA FORESTAL EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

Aprobación de Tesis



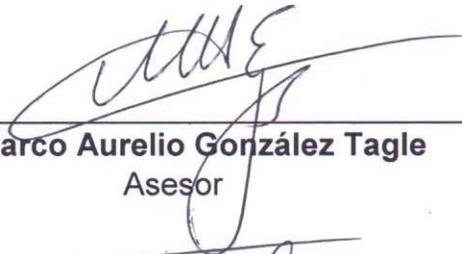
Dr. Eduardo Alanís Rodríguez

Director



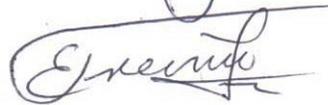
Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Codirector



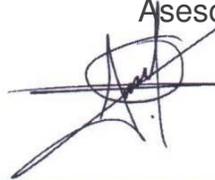
Dr. Marco Aurelio González Tagle

Asesor



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Asesor



Dr. Arturo Mora Olivo

Asesor Externo

Enero, 2019

AGRADECIMIENTOS

Por ayudarme a comprender que la vida puede ser como una escuela de experiencias en la cual todos somos alumnos, en esta etapa de mi vida, quiero agradecerle:

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico otorgado para realizar mis estudios de Doctorado.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, a su personal docente, técnico y administrativo por transmitir sus conocimientos, experiencias y por ayudarme en todo en esta etapa académica.

Al Dr. Eduardo Alanís Rodríguez, director de esta tesis, por su amistad, apoyo, motivación y dedicación para la culminación de esta investigación, agradezco profundamente sus enseñanzas y consejos.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, al Dr. Marco Aurelio González Tagle, al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza y al Dr. Arturo Mora Olivo, por ser parte de mi comité de tesis, por sus valiosas contribuciones, sugerencias y por el tiempo dedicado en la revisión del escrito.

Al Dr. Alejandro Valdecantos Dema, por su apoyo incondicional durante mi estancia en la Universidad de Alicante, España, por sus sugerencias y aportaciones para enriquecer mi trabajo de investigación.

Al Dr. Javier Corral Rivas por la aportación de información para la elaboración de este escrito, así como por la revisión de este mismo.

Al M. C. Ernesto Rubio Camacho por su valiosa contribución y orientación en los análisis de distribución espacial.

A mis compañeros de clases y amigos que nos apoyamos mutuamente, a mis amigos: Geraldine, Martín, Israel, Juan, Rigo, Perla, Jonathan, Ricardo y Ulises.

DEDICATORIAS

A mi mamá Josefina Ávila y mi tía Bertha Graciano, por su cariño, consejos y apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mi abuela Dolores Villarreal Santos (mamá Lola) y mi papá Pablo Robles (papá Pablo) que, aunque ya no están conmigo siempre fueron y serán un ejemplo de persistencia y tenacidad para superarme en la vida.

A todos mis hermanos, pero sobre todo a mi apreciado hermano Pedro Antonio Graciano, por sus consejos y por estar ahí cuando más lo necesito.

A Dios por todo lo que me ha dado.

Gabriel

ÍNDICE

Resumen	i
Abstract.....	iii
Introducción.....	1
Justificación.....	4
Hipótesis.....	5
Objetivos	6
General	6
Particulares	6
Capítulo I	
Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México.....	7
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	9
Materiales y métodos.....	11
Resultados.....	13
Discusión.....	16
Capítulo II	
Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México.....	20
Resumen.....	21
Abstract.....	22
Introducción.....	22
Materiales y métodos.....	24
Resultados y discusión.....	27

Capítulo III

Composición y estructura del estrato arbóreo bajo diferentes tratamientos silvícolas en un ecosistema forestal de la Sierra Madre Occidental (México).....34

Resumen.....	35
Abstract.....	36
Introducción.....	37
Materiales y métodos.....	38
Resultados y discusión.....	43

Capítulo IV

Composición y estructura espacial de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*.....51

Resumen.....	52
Abstract.....	53
Introducción.....	54
Materiales y métodos.....	55
Resultados.....	60
Discusión.....	67

Capítulo V

Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México.....70

Resumen.....	71
Abstract.....	72
Introducción.....	73
Materiales y métodos.....	74
Resultados.....	79
Discusión.....	87

Conclusiones 91

Bibliografía 94

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I

Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México

Tabla 1. Nombre científico, nombre común y familia de las especies registradas en el área de estudio.....	14
Tabla 2. Parámetros estructurales estimados para las familias registradas en el área de estudio.....	14
Tabla 3. Parámetros estructurales estimados para las especies registradas en el área de estudio.....	15
Tabla 4. Valores de diámetro, altura, cobertura, índice de valor forestal (<i>IVF</i>) y volumen para las especies vegetales presentes en el área de estudio.....	16

Capítulo II

Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México

Tabla 1. Ecuaciones para estimar volumen rollo total árbol de Shumacher y Hall (Contreras y Návar, 1997) para diferentes especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.....	26
Tabla 2. Ecuaciones para estimar la biomasa para diferentes especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.....	26
Tabla 3. Nombre científico, genero, familia y forma de crecimiento de las especies registradas en el área de estudio.....	27
Tabla 4. Distribución de árboles (por hectárea) por especies en los sitios de muestreo.....	28

Capítulo III

Composición y estructura del estrato arbóreo bajo diferentes tratamientos silvícolas en un ecosistema forestal de la Sierra Madre Occidental (México)

Tabla 1. Número de árboles por hectárea (<i>N</i>) y área basal por hectárea (<i>G</i>) en los sitios de muestreo.....	44
--	----

Tabla 2. Media y desviación estándar de cada uno de los índices por sitio...46

Capítulo IV

Composición y estructura espacial de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*

Tabla 1. Características básicas de los cinco sitios.....57

Tabla 2. Altura, diámetro promedio (\pm desviación estándar) y cobertura total de las cinco asociaciones de *P. durangensis*.....61

Tabla 3. Media y desviación estándar (σ) de los índices estructurales por sitio (mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia)62

Capítulo V

Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México

Tabla 1. Ecuaciones para estimar volumen rollo total árbol de Shumacher y Hall para diferentes especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.....78

Tabla 2. Nombre científico y común, y familia de especies arbóreas registradas en el área de estudio.....79

Tabla 3. Valores del índice vertical de Pretzsch.....81

Tabla 4. Parámetros estructurales estimados para las especies registradas en el área de estudio por estrato en cada año de medición.....84

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I

Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México

Figura 1. Localización del área de estudio.....	11
---	----

Capítulo II

Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frio de Durango, México

Figura 1. Localización del área de estudio.....	25
Figura 2. Distribución de la altura por sitio (a) y distribución de la altura por especie (b).....	29
Figura 3. Distribución de diámetro por sitio (a) y distribución del diámetro por especie (b).....	30
Figura 4. Contenido de volumen por especie.....	30
Figura 5. Contenido de biomasa por especie.....	31
Figura 6. Contenido de carbono por especie.....	32
Figura 7. Relación área basal con el contenido de carbono.....	33

Capítulo III

Composición y estructura del estrato arbóreo bajo diferentes tratamientos silvícolas en un ecosistema forestal de la Sierra Madre Occidental (México)

Figura 1. Localización del área de estudio.....	39
Figura 2. Distribución espacial del arbolado por sitio.....	43
Figura 3. Distribuciones diamétricas en los rodales estudiados.....	45
Figura 4. Distribución de frecuencias del índice de uniformidad de ángulos de Gadow (W_i) para los dos sitios.....	46
Figura 5. Distribución de la frecuencia porcentual de los valores del índice de mezcla de especies de Gadow (M_i) en los sitios evaluados.....	47
Figura 6. Grado de diferenciación diamétrica (TD_i) por sitio.....	48
Figura 7. Grado de diferenciación diamétrica (TH_i) por sitio.....	48

Figura 8. Grado de dominancia en diámetros (UD_i) por sitio.....	49
Figura 9. Grado de dominancia en alturas (UH_i) por sitio.....	50

Capítulo IV

Composición y estructura espacial de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*

Figura 1. Localización del área de estudio.....	56
Figura 2. Representación de la distribución espacial del arbolado por sitio en el área de estudio.....	57
Figura 3. Representación esquemática de los índices estructurales de mezcla (a) uniformidad de ángulos (b) y dominancia (c).....	59
Figura 4. Frecuencia de especies por sitio.....	61
Figura 5. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y mezcla.....	63
Figura 6. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y dominancia....	65
Figura 7. Distribución bivariada de mezcla y dominancia.....	66

Capítulo V

Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México.

Figura 1. Localización del área de estudio.....	73
Figura 2. Valores por estratos y totales de a) Número de árboles por ha ($N\ ha^{-1}$); b) Área basal ($m^2\ ha^{-1}$); c) Área de copa ($m^2\ ha^{-1}$); d) Volumen total árbol ($m^3\ ha^{-1}$).....	83
Figura 3. Distribución de individuos ($N\ ha^{-1}$) por clase diamétrica por estrato para los años 2007, 2012 y 2017.....	84
Figura 4. a) Riqueza de especies por estrato y total; b) Índice de Shannon por estrato y total.....	85

RESUMEN

La Sierra Madre Occidental (SMO) es el complejo montañoso más largo y continuo de México, presenta la mayor diversidad de asociaciones de pinos, encinos y madroños a nivel mundial. Dentro de este complejo montañoso se encuentra el estado de Durango, el cual ocupa el cuarto lugar en extensión territorial con el 6.3% del territorio nacional (123,317 km²) y es el mayor productor forestal maderable del país con 2,039,295 m³r. En este estado se han realizado diversas investigaciones que evalúan la composición y estructura del estrato arbóreo de bosques, sin embargo, estas son puntuales para algunas localidades específicas y aún existen muchas áreas sin evaluar. El objetivo de la tesis fue caracterizar la estructura horizontal y vertical, así como estimar el volumen, biomasa y contenido de carbono del estrato arbóreo en bosques bajo manejo forestal de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango. La información es derivada de sitios permanentes cuadrangulares, de 2500 m² (50 m x 50 m) establecidos en bosques que fueron áreas de aprovechamiento forestal. Se realizó un censo de las especies arbóreas. A cada individuo se le hicieron mediciones de diámetro normal ($d_{1.30}$), altura total (h), diámetro de copa (d_{copa}), se registró la especie a la que pertenecía, se registró la distancia en metros y azimut en grados desde el centro del sitio. En el ejido La Campana se presentó una densidad de 787 ind ha⁻¹, una dominancia (área basal) de 22,93 m² ha⁻¹ y una cobertura de copa de 8838 m² ha⁻¹, *Pinus durangensis* presentó el mayor índice de valor de importancia con 35.69% de IVI_{rel} y mayor índice de valor forestal con 48.96% IVF_{rel} , para el índice de Margalef se obtuvo un valor de $D_{\text{Mg}} = 1.58$, lo cual indica una baja riqueza de especies. En el ejido La Victoria el bosque presentó una densidad de 575 árboles ha⁻¹, un volumen total de 207.36 m³ ha⁻¹ y una concentración de biomasa total de 130.28 Mg ha⁻¹, con relación al carbono, se presentó un total de 65.14 Mg ha⁻¹, las especies con mayor volumen, biomasa y carbono acumulado fueron *Pinus durangensis*, *P. cooperi* y *Quercus sideroxyla*. En la evaluación de la estructura espacial de dos sitios con diferentes tratamientos silvícolas (corta de regeneración y corta de selección) se registraron

seis y siete especies para los sitios uno y dos, respectivamente, y una densidad de 632 n ha⁻¹ y 760 n ha⁻¹, un área basal de 16.18 m² ha⁻¹ y 23.18 m² ha⁻¹, el sitio con corta de regeneración presentó un mayor número de especies y un mayor grado de mezcla, mientras que el sitio con corta de selección presentó mayor diferenciación en diámetros y alturas. En la caracterización estructural bivariada de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis* se encontró que el bosque puro de *P. durangensis* presentó los individuos con mayor altura, mientras que el mayor diámetro fue para la asociación con *P. teocote*, el índice de mezcla (*Mi*) indica que solo en el bosque puro existe una baja mezcla de especies, el índice de uniformidad de ángulos (*Wi*) muestra que los árboles de manera general tienen una distribución aleatoria, los valores de dominancia (*Ui*) muestran que en todos los sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa. En la evaluación de la composición y estructura de especies arbóreas en un periodo de 10 años se encontró que, aunque se presentó un aumento en área basal, volumen y cobertura, este no fue estadísticamente significativo. Los estratos II y III presentaron el mayor aumento en área basal y volumen. La cobertura fue mayor al 100 % presentando la mayor contribución el estrato III. La composición de especies fue muy similar en las tres mediciones, siendo el estrato III el más diverso. *Pinus durangensis*, es la especie de mayor importancia ecológica en los estratos I y II, mientras que *Quercus sideroxylla* presenta mayor relevancia en el estrato III.

ABSTRACT

The Sierra Madre Occidental (SMO) is the longest and most continuous mountain complex in Mexico. It has the highest diversity of associations of pines, oaks and strawberry trees worldwide. Within this mountainous complex is the state of Durango, which occupies the fourth place in territorial extension with 6.3% of the national territory (123,317 km²) and is the largest timber producer in the country with 2,039,295 m³r. In this state there have been several investigations that evaluate the composition and structure of the arboreal stratum of forests, however, these are specific for some specific localities and there are still many areas that have not been evaluated. Therefore, the objective of the thesis was to characterize the horizontal and vertical structure, as well as to estimate the volume, biomass and carbon content of the tree stratum in forests under forest management of the Sierra Madre Occidental of the state of Durango. The information derived from permanent quadrangular sites, of 2500 m² (50 m x 50 m) established in forests that were areas of forest use. A census of the arboreal species was carried out. Each individual was given measurements of normal diameter ($d_{1.30}$), total height (h), crown diameter (d_{copa}), the species to which it belonged was registered, the distance in meters and azimuth in degrees from the center of the site. In the La Campana ejido there was a density of 787 ind ha⁻¹, a dominance (basal area) of 22.93 m² ha⁻¹ and a canopy cover of 8838 m² ha⁻¹, *Pinus durangensis* presented the highest value index of importance with 35.69% of IVI_{rel} and greater index of forest value with 48.96% IVF_{rel} , for the Margalef index a value of $DMg = 1.58$ was obtained, which indicates a low species richness. In ejido La Victoria the forest has a density of 575 trees ha⁻¹, a total volume of 207.36 m³ ha⁻¹ and a total biomass concentration of 130.28 Mg ha⁻¹, in relation to carbon, a total of 65.14 Mg ha⁻¹ was presented, the species with the highest volume, biomass and accumulated carbon were *Pinus durangensis*, *P. cooperi* and *Quercus sideroxylla*. In the evaluation of the spatial structure of two sites with different silvicultural treatments (regeneration cut and selection cut), six and seven species were recorded for sites one and two, respectively, and a density of 632 n ha⁻¹ and 760 n ha⁻¹, a basal area of 16.18 m² ha⁻¹ and 23.18 m² ha⁻¹, the

site with regeneration cut presented a greater number of species and a greater degree of mixing, while the site with selection cut has greater differentiation in diameters and heights. In the evaluation of the composition and structure of tree species in a period of 10 years it was found that, although there was an increase in basal area, volume and coverage, this was not statistically significant. Strata II and III showed the greatest increase in basal area and volume. The coverage was greater than 100%, with the highest contribution being stratum III. The composition of species was very similar in the three measurements, with stratum III being the most diverse. *Pinus durangensis*, is the species of greatest ecological importance in strata I and II, while *Quercus sideroxylla* has greater relevance in stratum III.

INTRODUCCIÓN

En México, la Sierra Madre Occidental (SMO) es el complejo montañoso más largo y continuo, extendiéndose desde el norte del país hasta el estado de Jalisco. Este sistema es un importante corredor biológico para las especies boreales y tropicales de montaña, destacando las plantas leñosas y las herbáceas (Rzedowski, 1978; Felger *et al.*, 1997). En este sistema montañoso existen extensas superficies boscosas alojando a numerosas especies de plantas, entre las que destacan 24 especies de *Pinus*, siendo uno de los géneros predominantes en esta zona (Rzedowski, 1978; González-Elizondo *et al.*, 2012). Dentro de la SMO se encuentra el estado de Durango, el cual ocupa el cuarto lugar en extensión territorial con el 6.3% del territorio nacional (123,317 km²) y es el mayor productor forestal maderable del país con 2,039,295 m³r. (SEMARNAT, 2016).

La diversidad y la estructura son, junto con la densidad, las principales características de los ecosistemas forestales (Gadow *et al.*, 2007). El programa UNEP (United Nations Environment Programme, 1992), afirma que la biodiversidad o diversidad biológica es la variabilidad entre los organismos vivientes de todas las fuentes incluyendo, entre otros, a los organismos terrestres, marinos y de otros ecosistemas acuáticos, así como los complejos ecológicos de los que forman parte; esto incluye diversidad dentro de las especies, entre especies y diversidad de ecosistemas. La estructura de un sitio forestal es el resultado de los hábitos de crecimiento de las especies arbóreas, así como de las condiciones ambientales y de las prácticas de manejo bajo las cuales se desarrolló y originó el sitio a través del tiempo (Wenger, 1984). Por otro lado, la información sobre la biomasa y el volumen de árboles es importante para señalar el papel que desempeñan los recursos forestales en el almacenamiento de carbono (FAO, 1998).

A continuación se describen brevemente los capítulos que conforman la tesis:

Capítulo I: Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México. En este estudio se caracterizó la composición y estructura de un ejido forestal en el estado de Durango. Para cada especie se obtuvo el índice de valor de importancia (*IVI*), índice de valor forestal (*IVF*) y se calculó el volumen. Además, se calcularon el índice de valor de importancia familiar (*IVIF*), índice de diversidad de Shannon (H') y riqueza de Margalef (D_{MG}).

Capítulo II: Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono en un bosque de clima templado-frío de Durango, México. En esta investigación se estimó el volumen, biomasa y contenido de carbono de especies arbóreas en un bosque de Durango, México. Para cada una de las especies se determinó su volumen y biomasa total árbol utilizando ecuaciones alométricas generadas por diferentes autores. Para determinar el contenido de Carbono se multiplicó el valor de la biomasa por el factor 0.5, ya que según resultados de muchos autores este valor representa la concentración de carbono promedio para coníferas y hojosas.

Capítulo III: Composición y estructura del estrato arbóreo bajo diferentes tratamientos silvícolas en un ecosistema forestal de la Sierra Madre Occidental (México). En este estudio se evaluó la estructura espacial del estrato arbóreo de dos sitios tratados con diferentes tratamientos silvícolas en la Sierra Madre Occidental (corta de regeneración [sitio 1] y corta de selección [sitio 2]). Para cada sitio, se analizó el número de árboles por hectárea (N), el área basal por hectárea (G), así como el grado de agregación, la mezcla y la diferenciación de tamaño.

Capítulo IV: Composición y estructura espacial de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*. En esta investigación se estudiaron las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *P. durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla. Para cada sitio se calcularon los índices de mezcla de especies, uniformidad de

ángulos y dominancia. Los índices se combinaron dos a dos para obtener tres distribuciones bivariantes.

Capítulo V: Cambios en la composición y estructura de especies arbóreas en un bosque templado de Durango, México. En este trabajo se evaluó el efecto del manejo forestal en la composición y estructura de especies arbóreas en un periodo de 10 años. Se definieron tres estratos de altura para cada año de medición bajo la metodología del índice de Pretzsch tomando en cuenta la altura mayor de cada medición. Se calcularon el índice de valor de importancia (*IVI*), riqueza y diversidad. A todas las variables dasométricas por estrato se les realizaron pruebas de comparación de medias entre evaluaciones.

JUSTIFICACIÓN

El aprovechamiento forestal es considerado como una de las prácticas silviculturales con el propósito de manejar el bosque, influyendo en el dinamismo de los ecosistemas y afectando la composición del bosque en cuanto a su estructura y biodiversidad. Esta práctica crea condiciones de desarrollo para las especies de mayor importancia económica y disminuye la proporción de especies de importancia ecológica por tener menor valor económico.

En México de manera particular, una de las causas de degradación de los bosques ha sido principalmente por la mala aplicación del manejo forestal, pues ha sido muy selectivo sobre las mejores especies de árboles e individuos lo que ha ocasionado un cambio en la composición, estructura y la función del bosque.

La información sobre la estructura del bosque contribuye a una mejor comprensión de la historia y la función del bosque y del potencial de desarrollo futuro de un ecosistema forestal. Por lo tanto, este tipo de información es de gran importancia para el desarrollo de planes de investigación, conservación, manejo y uso sustentable de los recursos forestales. La planeación requiere contar con información sobre la estructura, crecimiento, producción y regeneración natural de las diferentes especies arbóreas para detectar cambios y para establecer prácticas con los que se pueda alcanzar el manejo sustentable.

De esta forma en la presenta investigación se estudió la estructura de diversas áreas de bosques de clima templado a través del monitoreo forestal de parcelas permanentes de investigación silvícola, las cuales constituyen una fuente de información importante en manejo e investigación forestal.

HIPÓTESIS

- Los índices de diversidad, así como los parámetros ecológicos de abundancia, dominancia, frecuencia e índice de valor de importancia permiten identificar las especies arbóreas con el mayor peso ecológico en un ejido forestal del estado de Durango.
- La estimación de volumen y biomasa es posible mediante la utilización de ecuaciones alométricas ya establecidas.
- La diversidad y estructura espacial es diferente en dos sitios bajo diferente tratamiento silvícola.
- La combinación de los índices de mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia proporcionan información sintetizada de las características estructurales bivariadas de los bosques.
- El aprovechamiento forestal mantiene la composición de especies e incrementa el área basal y el volumen.

OBJETIVOS

General

- Caracterizar la estructura horizontal y vertical, así como estimar el volumen, biomasa y contenido de carbono del estrato arbóreo en bosques bajo manejo forestal de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango.

Particulares

- Caracterizar la composición y estructura arbórea de un bosque templado en el estado de Durango.
- Estimar el volumen, biomasa y contenido de carbono de especies arbóreas en un bosque templado del noroeste de México.
- Evaluar la composición y estructura de estrato arbóreos en dos sitios con diferentes tratamientos silvícolas (corta de regeneración y corta de selección).
- Estudiar las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *P. durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla.
- Evaluar el efecto del manejo forestal en la composición (riqueza y diversidad de especies) y estructura (abundancia, área de copa, volumen e índice de Pretzsch) de especies arbóreas en un periodo de 10 años.

CAPÍTULO I

**CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL ARBOLADO EN UN
EJIDO FORESTAL DEL NOROESTE DE MÉXICO**

**STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF THE TREES OF A
FOREST EJIDO OF NORTHWEST MEXICO**



Fotografía de un bosque en el ejido La Campana.

Manuscrito sometido el 15 de diciembre de 2016. Aceptado el 29 de abril de 2017. Este documento se debe citar como: Graciano-Ávila, G., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, Ó. A., González-Tagle, M. A., Treviño-Garza, E. J. y Mora-Olivo, A. (2017). Caracterización estructural del arbolado en un ejido forestal del noroeste de México. *Madera y Bosques*, 23(3),137-146. doi: 10.21829/myb.2017.2331480.

CAPÍTULO I

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DEL ARBOLADO EN UN EJIDO FORESTAL DEL NOROESTE DE MÉXICO

Resumen

El objetivo de este estudio fue caracterizar la composición y estructura de un ejido forestal en el estado de Durango. Para ello se establecieron 10 sitios de muestreo de 2500 m², donde se realizó un censo de las especies arbóreas. A cada individuo se le hicieron mediciones de diámetro normal ($d_{1.30}$), altura total (h), diámetro de copa (d_{copa}) y se registró la especie a la que pertenecía. Para cada especie se obtuvo el índice de valor de importancia (IVI), índice de valor forestal (IVF) y se calculó el volumen. Además, se calcularon el índice de valor de importancia familiar ($IVIF$), índice diversidad de Shannon (H') y riqueza de Margalef (D_{MG}). En total se registraron cinco familias, cinco géneros y 13 especies. Este bosque presenta una densidad de 787 ind ha⁻¹, una dominancia (área basal) de 22.93 m² ha⁻¹ y una cobertura de copa de 8838 m² ha⁻¹. *Pinus durangensis* presentó el mayor índice de valor de importancia con 35.69% de IVI_{rel} y mayor índice de valor forestal con 48.96% de IVF_{rel} . Para el índice de Margalef se obtuvo un valor de $D_{MG} = 1.58$, lo cual indica una baja riqueza de especies. Con lo anterior se aportan elementos cuantitativos de la vegetación arbórea de un bosque heterogéneo de la Sierra Madre Occidental.

Palabras clave: Durango, estrato arbóreo, índices de diversidad, *Pinus durangensis*, Sierra Madre Occidental, volumen.

Abstract

The objective of this study was to characterize the composition and structure of a forest ejido in the state of Durango. To this end, 10 sampling sites of 2500 m² were established, within which a census was conducted of all tree species. On each individuals measurements of normal diameter ($d_{1.30}$), total height (h), of crown diameter (d_{copa}) were made and the species to which each individual belonged was recorded. For each species the index of value importance family ($IVIF$), index of value importance (IVI), index value forestry were obtained and the total volume calculated. The Shannon (H') and Margalef indices (D_{MG}) were also calculated. In total 13 species, five genders and five families were recorded. This forest area had a density of 787 ind ha⁻¹, a dominance (basal area) 22.93 m² ha⁻¹ and a crown cover of 8838 m² ha⁻¹. *Pinus durangensis* had the highest value of importance index with 35.69% of IVI_{rel} and the largest value forestry index with 48.96% IVF_{rel} . With all of the above, quantitative elements of the timberline in a heterogeneous forest of the Sierra Madre Occidental were provided.

Keywords: Durango, arboreal layer, diversity indices, *Pinus durangensis*, Sierra Madre Occidental, volume.

Introducción

La caracterización de la estructura es importante para entender el funcionamiento de los ecosistemas forestales y ayuda a tomar decisiones informadas sobre el manejo adecuado de los bosques (Aguirre, Kramer y Jiménez, 1998; Albert, 1999; Aguirre, Hui, Von Gadow y Jiménez, 2003; Corral, Aguirre, Jiménez y Corral, 2005; Castellanos- Bolaños *et al.*, 2008). La estructura del estrato arbóreo es un buen indicador de la biodiversidad de un bosque y esta se puede modificar por medio de la silvicultura (Pretzsch, 1998; Del Río, Montes, Cañellas y Montero, 2003; Corral *et al.*, 2005; Solis *et al.*, 2006). La diversidad es un concepto que permite diferentes interpretaciones, aunque, en general, este término se emplea

como sinónimo de diversidad de especies (Gadow, Sánchez y Álvarez, 2007). Una mezcla definida de especies determina factores microambientales, como el régimen de luz (Canham, Finzi, Pacala y Burbank, 1994) y la composición de la materia orgánica (Ferrari, 1999), controlando así una gran variedad de procesos bióticos y abióticos (Emborg, 1998). Si bien el conocimiento de la estructura y diversidad de las especies arbóreas en bosques templados es importante para la gestión y conservación, en el Noroeste de México aún existen localidades donde no se han generado estudios específicos.

Gran parte del estado de Durango se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre Occidental (SMO) la cual recorre el estado en dirección noroeste-sureste y representa el macizo montañoso de mayor longitud del territorio nacional (González-Elizondo *et al.*, 2013). Este sistema montañoso tiene un alto valor económico y ambiental, ya que abastece los mantos freáticos y presenta alta diversidad de especies y proporción de endemismos (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente de Durango [SRNyMA], 2007). La SMO es considerada como un importante corredor biológico tanto para especies boreales como elementos tropicales de montaña, destacando en el primer caso las plantas leñosas y en el segundo, las herbáceas (Rzedowski, 1978; Bye, 2005), siendo en esta región donde se presenta la mayor diversidad de asociaciones de pinos, encinos y madroños a nivel mundial (González-Elizondo, González-Elizondo, Tena-Flores, Ruacho-González y López-Enríquez *et al.*, 2012).

La diversidad florística de la región se manifiesta en estudios como los de González (1983), González, González y Márquez (2007) y Valenzuela-Núñez y Granados-Sánchez (2009). En un trabajo realizado por Márquez, González y Álvarez (1999) se registraron 27 especies al estudiar los componentes de la diversidad arbórea en bosques de pino encino de Durango. Diversos estudios señalan que las familias dominantes en los bosques de Durango son Pinaceae y Fagaceae (Gonzalez-Elizondo, Gonzalez-Elizondo y Cortes-Ortiz, 1993, González *et al.*, 2007; Márquez-Linares y González-Elizondo 1998; Aragón-Piña, Garza-Herrera, González-Elizondo y Luna-Vega, 2010). El presente trabajo tiene

como objetivo caracterizar la composición y estructura arbórea de un bosque templado en el estado de Durango.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó en el ejido La Campana, ubicado en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental al sudoeste del estado de Durango (noroeste de México), en el municipio de Pueblo Nuevo. Está enmarcado geográficamente entre los paralelos $23^{\circ} 42' 34,48''$ y $23^{\circ} 49' 28,18''$ de latitud Norte y los meridianos $105^{\circ} 30' 11,83''$ y $105^{\circ} 40' 6,56''$ de longitud Oeste (Figura 1).

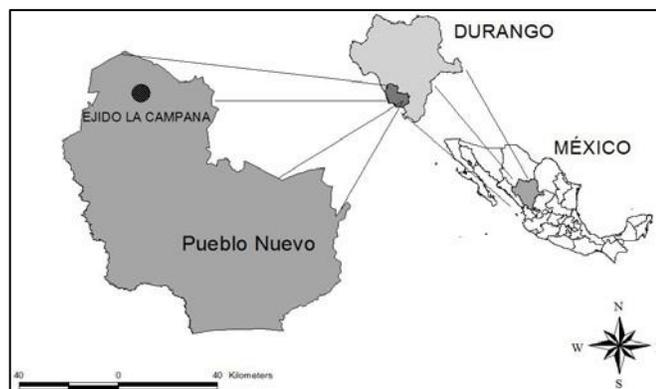


Figura 1. Localización del área de estudio.

La altura sobre el nivel del mar varía entre 2400 m y 2600 msnm con un promedio ponderado de 2500 m de altura. Los tipos de suelo presentes son litosol, cambisol y regosol con textura predominantemente gruesa a media. El tipo de roca predominante es ígnea extrusiva ácida (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 1984). En esta zona prevalecen climas de tipo (A)C(W2), C(W2), C(E)(M) y C(E)(W2), la precipitación promedio media anual es de 1200 mm y la temperatura es de 18°C (Inegi, 2009). Los tipos de vegetación predominantes corresponden a formaciones naturales de bosques de pino y pino-encino.

En otoño de 2007 se establecieron 10 sitios permanentes de muestreo, cuadrangulares, de 2500 m² (50 m x 50 m) donde se obtuvieron los datos dasométricos del arbolado. La ubicación de los sitios se realizó a nivel de predio, a través de muestreo sistemático, sobreponiendo una malla de puntos equidistantes de distancia de cinco kilómetros. Las variables dasométricas medidas fueron diámetro normal (cm), altura total (m), diámetro de copa

(m) y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo de acuerdo con sus características y estructura (García y González, 1998). Estas mediciones se realizaron en los 10 sitios, a todos los árboles con diámetro normal ($d_{1.30} \geq 7.5$ cm).

Se determinó la abundancia de cada especie, de acuerdo con el número de árboles; la dominancia, en función del área basal y la frecuencia con base en su presencia en los sitios de muestreo. Las variables relativizadas se utilizaron para obtener un valor ponderado a nivel de especie denominado índice de valor de importancia (*IVI*), que adquiere valores porcentuales en una escala de 0 a 100 (Müeller-Dombois y Ellenberg, 1974).

Adicionalmente, se determinó la importancia ecológica en el nivel taxonómico de familia de acuerdo con el índice de importancia familiar (*IVIF*), el cual considera la abundancia, la dominancia y la frecuencia relativa de cada familia de plantas. Las variables relativizadas se utilizaron para obtener un valor ponderado a nivel de familia de 0% a 100% (Whittaker, 1972; Mori, Boom, De Carvalho y Dos Santos, 1983; Moreno, 2001).

El índice de valor forestal (*IVF*) se estimó con el propósito de evaluar la estructura bidimensional de la vegetación arbórea considerando tres medidas: la primera al nivel del estrato inferior en el plano horizontal (diámetro a la altura del pecho), la segunda que incluye los estratos inferior y superior en el plano vertical (altura), y la tercera al nivel del estrato superior en el plano horizontal (cobertura) (Corella *et al.*, 2001).

Para estimar la riqueza de especies se utilizó el índice de Margalef (D_{MG}) y para la diversidad alfa el índice de Shannon-Weaver (H') (Shannon, 1948; Magurran, 2004). Para cada una de las especies se determinó el volumen total árbol utilizando las ecuaciones de Shumacher y Hall sugeridas por Contreras y Návar, (1997), las cuales se utilizan para estimar el volumen de las principales especies de pino en la Sierra Madre Occidental. De esta forma a cada una de las especies se les aplicó la ecuación correspondiente.

Resultados

Se muestrearon un total de 1967 árboles con diámetro a la altura del pecho mayor o igual a 7.5 cm, pertenecientes a 13 especies, distribuidas en cinco géneros y cinco familias de árboles (Tabla 1). La familia más representativa fue Pinaceae con cinco especies: *P. ayacahuite*, *P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. leiophylla*, *P. teocote*; seguida de Ericaceae con cuatro especies. Juntas, estas dos familias incluyeron dos géneros y nueve especies, lo que constituye 64.29% de la composición arbórea registrada en los 10 sitios de muestreo.

La familia Pinaceae fue la más importante de acuerdo con los valores del índice de valor de importancia familiar (*IVIF*) dentro del área de estudio con 57.29% del total, pues presentó la mayor abundancia (73.87% del área total), mayor dominancia (70.96% del área total) y se presentó en todos los sitios de muestreo. Las familias Cupressaceae y Betulaceae fueron las que presentaron menos de 10% de *IVIF* (Tabla 2).

La comunidad vegetal del área de estudio presentó una densidad de 787 árboles por hectárea. La especie con mayor densidad fue *P. durangensis* con 364 árboles por hectárea, que representa un valor porcentual de 46.21%, proporción similar al 47.30% para *P. montezumae* encontrado por López-Hernández *et al.* (2017) en un bosque templado del estado de Puebla. *P. teocote* registró 109 árboles por hectárea, seguido de *Q. sideroxylla* con 80 árboles por hectárea y *P. ayacahuite* con 56 árboles por hectárea sumando 77.38%. La especie menos abundante fue

Arbutus arizonica (1 árbol por hectárea) (Tabla 3).

Tabla 1. Nombre científico, nombre común y familia de las especies registradas en el área de estudio (ordenadas alfabéticamente por nombre científico).

Nombre científico	Nombre común	Familia
<i>Alnus jorullensis</i> Kunth	Aliso	Betulaceae
<i>Arbutus arizonica</i> (A.Gray) Sarg.	Madroño liso	Ericaceae
<i>Arbutus bicolor</i> S. González, M. González & P.D. Sørensen	Madroño	Ericaceae
<i>Arbutus tessellata</i> P.D Sørensen	Madroño pegajoso	Ericaceae
<i>Arbutus madrensis</i> S. González	Madroño roñoso	Ericaceae
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	Táscate	Cupressaceae
<i>Pinus ayacahuite</i> C. Ehrenb. ex Schldtl.	Pino cahuite	Pinaceae
<i>Pinus cooperi</i> C.E. Blanco	Pino chino	Pinaceae
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	Ocote	Pinaceae
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schldtl. & Cham.	Pino prieto	Pinaceae
<i>Pinus teocote</i> Schldtl. & Cham.	Pino colorado	Pinaceae
<i>Quercus rugosa</i> Née	Encino blanco	Fagaceae
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae

Tabla 2. Parámetros estructurales estimados para las familias registradas en el área de estudio.

Familia	Abundancia		Dominancia		Frecuencia		IVIF
	Absoluta (N ha ⁻¹)	Relativa (%)	Absoluta (m ² ha ⁻¹)	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)	
Pinaceae	581.2	73.87	16.28	70.96	100	27.03	57.29
Fagaceae	89.2	11.34	4.74	20.67	100	27.03	19.68
Ericaceae	61.2	7.78	1.17	5.11	90	24.32	12.40
Cupressaceae	33.2	4.22	0.51	2.23	50	13.51	6.65
Betulaceae	22	2.80	0.24	1.03	30	8.11	3.98
Total	787	100	22.93	100	370	100	100

IVIF = índice de valor de importancia familiar. Las familias están ordenadas en forma descendente según su IVIF.

El género *Pinus* presentó la mayor dominancia en comparación a los demás géneros. Las especies con mayor área basal fueron *P. durangensis* con 46.77%, *Q. sideroxyla* con 20%, *P. cooperi* con 8.27%, y *P. teocote* con 8%, sumando 83.04% del total. *P. leiophylla* presentó el valor más bajo de esta variable (0.26%) (Tabla 3).

El género *Pinus* se presentó en los 10 sitios de muestreo. A nivel especie, *P. durangensis*, *Q. sideroxyla* y *P. teocote* se encontraron en todos los sitios con 14.08% de frecuencia relativa cada uno, seguidos de *P. cooperi* que se encontró en nueve sitios de muestreo (90% de frecuencia absoluta) representando 12.68% de frecuencia relativa (Tabla 3).

El índice de valor de importancia define cuáles de las especies presentes contribuyen en el carácter y estructura de un ecosistema (Cottam y Curtis, 1956). Las especies *P. durangensis* (35.69%), *Q. sideroxylla* (14.75%) y *P. teocote* (11.99%) fueron las especies más sobresalientes al registrar los valores más altos sumando 62.43% del total de la comunidad. La especie más rara fue *A. arizonica*, presentando valores por debajo de uno por ciento (Tabla 3).

Tabla 3. Parámetros estructurales estimados para las especies registradas en el área de estudio.

Especie	Abundancia		Dominancia		Frecuencia		IVI
	Absoluta ($N\ ha^{-1}$)	Relativa (%)	Absoluta ($m^2\ ha^{-1}$)	Relativa(%)	Absoluta	Relativa (%)	
<i>Pinus durangensis</i>	364	46.21	10.73	46.774	100	14.08	35.69
<i>Quercus sideroxylla</i>	80	10.17	4.59	19.998	100	14.08	14.75
<i>Pinus teocote</i>	109	13.88	1.84	8.003	100	14.08	11.99
<i>Pinus cooperi</i>	49	6.25	1.90	8.268	90	12.68	9.07
<i>Pinus ayacahuite</i>	56	7.12	1.76	7.653	60	8.45	7.74
<i>Arbutus bicolor</i>	31	3.91	0.46	1.995	70	9.86	5.26
<i>Juniperus deppeana</i>	33	4.22	0.51	2.227	50	7.04	4.50
<i>Alnus jorullensis</i>	22	2.80	0.24	1.033	30	4.23	2.68
<i>Arbutus tessellata</i>	21	2.64	0.49	2.147	20	2.82	2.54
<i>Quercus rugosa</i>	9	1.17	0.15	0.672	30	4.23	2.02
<i>Pinus leiophylla</i>	3	0.41	0.06	0.266	30	4.23	1.63
<i>Arbutus madrensis</i>	9	1.12	0.13	0.579	20	2.82	1.50
<i>Arbutus arizonica</i>	1	0.10	0.09	0.384	10	1.41	0.63
TOTAL	787	100	22.93	100	710	100	100

IVI = Índice de Valor de Importancia. Las especies están ordenadas en forma descendente según su IVI.

El IVF está conformado por los valores relativos del diámetro, altura y cobertura de las especies del área. El diámetro relativo mayor fue para *P. durangensis* con 47.55% seguido de *Q. sideroxylla* y *P. teocote* con 12.82% y 11.35% respectivamente. La mayor altura la presentó *P. durangensis* con 52.08% seguida de *P. teocote* con 12.83%. La cobertura de copa en el área fue de 8838.35 m² por hectárea, lo que indica que existe menos del 100% de la superficie cubierta por el dosel. *P. durangensis* y *Q. sideroxylla* fueron las especies con mayor cobertura al abarcar 5475.03 m² por hectárea, que equivale a 61.94% de la cobertura de copa de todas las especies en el área de estudio. La especie *P. durangensis* presentó el mayor IVF.

Con relación al volumen, el área de estudio presentó 173.46 m³ por hectárea. Las especies que resultaron con mayor volumen fueron las mismas que obtuvieron el mayor IVI e IVF. La especie *P. durangensis* fue la especie con mayor volumen

(73 m³ por hectárea) seguido de *Q. sideroxylla* (29.30 m³ por hectárea) (Tabla 4).

Tabla 4. Valores de diámetro, altura, cobertura, índice de valor forestal (*IVF*) y volumen para las especies vegetales presentes en el área de estudio. Las especies están ordenadas en forma descendente según su *IVF*.

<i>Especie</i>	<i>Diámetro</i>		<i>Altura</i>		<i>Cobertura</i>		<i>IVF</i>	<i>Volumen</i> m ³ h ⁻¹
	cm	%	m	%	m ² ha ⁻¹	%		
<i>Pinus durangensis</i>	6153.68	47.55	4505.74	52.08	4177.19	47.26	48.96	73.85
<i>Quercus sideroxylla</i>	1659.16	12.82	797.2	9.21	1297.84	14.68	12.24	29.3
<i>Pinus teocote</i>	1468.44	11.35	1109.72	12.83	845.91	9.57	11.25	9.7
<i>Pinus ayacahuite</i>	990.6	7.65	665.62	7.69	825.31	9.34	8.23	10.98
<i>Pinus cooperi</i>	994.8	7.69	702.28	8.12	751.28	8.5	8.10	3.79
<i>Juniperus deppeana</i>	430.56	3.33	245.72	2.84	229.87	2.6	2.92	5.74
<i>Arbutus bicolor</i>	386.08	2.98	183.84	2.12	247.32	2.8	2.64	1.36
<i>Arbutus tessellata</i>	301.32	2.33	133.44	1.54	163.03	1.84	1.91	1.67
<i>Alnus jorullensis</i>	249.88	1.93	144.76	1.67	115.22	1.3	1.64	0.71
<i>Quercus rugosa</i>	123.92	0.96	74.32	0.86	63.64	0.72	0.85	1.12
<i>Arbutus madrensis</i>	114.4	0.88	52.64	0.61	69.33	0.78	0.76	0.37
<i>Pinus leiophylla</i>	44.2	0.34	29	0.34	28.23	0.32	0.33	0.34
<i>Arbutus arizonica</i>	24.8	0.19	7.84	0.09	24.16	0.27	0.19	0.44
TOTAL	12941.84	100	8652.12	100	8838.35	100	100	139.36

La riqueza específica de la comunidad vegetal estudiada fue de 13 especies y presentó un índice de Margalef de $D_{Mg}=1.58$. En relación al valor de diversidad de especies, el valor del índice de Shannon fue de $H'=1.81$.

Discusión

La Sierra Madre Occidental es el más largo y continuo de los sistemas montañosos de México, presenta alrededor de nueve tipos de vegetación y diversas comunidades vegetales. Alberga 46% de las especies de pinos de México, 34% de los encinos y 100% de los madroños. A pesar de su importancia ambiental, económica y científica, la SMO es todavía una de las regiones menos conocidas biológica y ecológicamente en México, por lo que diversas comunidades requieren ser estudiadas de manera puntual (González-Elizondo *et al.*, 2012).

El área de estudio corresponde a una asociación de bosque de *Pinus durangensis-Quercus sideroxylla-Pinus teocote*. De León-Mata, García, Andrade

y Ruiz (2013) mencionan que estos bosques son localizados en altitudes de 2540 m a 2560 msnm en cordones montañosos, laderas de diferente exposición y pendiente, y cañadas, en suelos arcillosos y profundos con abundante materia orgánica.

De acuerdo con los resultados obtenidos el área evaluada corresponde a un ecosistema de estructura heterogénea donde existe una alta abundancia y una baja frecuencia de especies; López-Hernández *et al.* (2017) mencionan que estas son características de especies con tendencia a la conglomeración local de manchones y pequeños grupos bastante distantes unos de otros.

La familia ecológicamente más importante en el bosque estudiado es Pinaceae. Este resultado coincide con diversos autores que señalan que en la Sierra Madre Occidental del estado de Durango la familia Pinaceae es la más importante (González *et al.*, 1993; Márquez-Linares y González-Elizondo, 1998; Aragón *et al.*, 2010). De esta forma, el género *Pinus* se posiciona como el género con mayor número de especies presentes en el área de estudio, y posee 10% de las especies identificadas en México (52 especies de acuerdo con García y González [1998]). Esta proporción es inferior a lo registrado por Márquez *et al.* (1999), quienes registraron ocho especies del género *Pinus* al evaluar los componentes de la diversidad arbórea en bosques de Durango, pero similar a la encontrada por Hernández-Salas *et al.* (2013) en una región del ejido El Largo, Chihuahua, donde registraron cinco especies de pino.

La especie *P. durangensis* es la más importante económicamente dentro del predio estudiado junto con *Q. sideroxyla* y *P. teocote*. Esta especie fue la más abundante en este estudio y ha sido registrada en diversos estudios como la especie más abundante en los bosques templados de Durango (Valenzuela-Núñez y Granados-Sánchez, 2009). La importancia de *P. durangensis* es sobresaliente, pues se distribuye en 80% de la superficie arbolada y genera un volumen aprovechable anual del orden de los 190 000 m³ en el sur de chihuahua (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2005). *P. durangensis*, *Q. sideroxyla* y *P. teocote* fueron las especies que se registraron en todos los sitios

de muestreo. Estas especies muestran una estrecha relación ya que se encuentran asociadas entre sí (González, 1998; Márquez *et al.*, 1999) y han sido documentadas como unas de las más frecuentes en la Sierra Madre Occidental (Silva-Flores, Pérez-Verdín y Wehenkel, 2014). La distribución y abundancia de estas especies puede estar relacionada con la fisiografía dominante en esta zona, así como con la precipitación media anual (1200 mm) y la aplicación de los tratamientos silvícolas que favorecen a las especies comerciales más importantes.

De acuerdo con el área basal ($22.23 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), el área de estudio presenta un valor bajo, ya que Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, Kramer y Akça (2003), encontraron $32 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ para la parcela *Coa* y más de $50 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en las parcelas *Chichimoco* y *Fabián* (muy densas) en un valle alto protegido conocido como Santa Bárbara, en Durango. Esta variación en áreas basales dentro de los mismos bosques se debe a los diferentes tipos de intervenciones silvícolas que se aplican en la región.

El índice de valor de importancia permitió determinar el peso ecológico de las especies presentes en el área de estudio. *P. durangensis* fue la especie ecológicamente más importante. Esta misma especie ha sido señalada como la especie con el mayor valor ecológico en un bosque templado de Chihuahua (Hernández *et al.*, 2013). González- Elizondo *et al.* (2012), estudiaron la vegetación de la Sierra Madre Occidental y señalan que en áreas de mayor humedad ambiental *P. durangensis* es más dominante.

Los resultados del índice de valor forestal son similares a los del índice de valor de importancia, destacando *P. durangensis* y *Q. sideroxylla*, lo que confirma la importancia estructural de estas especies. Maldonado y Návar (2002) encontraron que *P. durangensis* presentó el mayor diámetro, altura y cobertura al ajustar y predecir la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. Como era de esperarse las especies con mayor *IVI* e *IVF* fueron las que resultaron tener la mayor cantidad de volumen,

ya que presentan los mayores diámetros y alturas.

El índice de Shannon obtenido ($H' = 1.81$), muestra un valor bajo de diversidad, ya que de acuerdo con Margalef (1972), este índice normalmente varía de 1 y 5, interpretando valores menores que 2 como diversidad baja. Sin embargo, esta área de estudio tiene mayor diversidad específica que otras zonas dentro de la SMO. Delgado, Heynes, Mares, Piedra y Ruacho (2016) publicaron valores de $H' = 0.77$ a $H' = 1.58$ en Coscomate, Pueblo Nuevo, Durango. Návar-Cháidez y González-Elizondo (2009), registraron valores de $H' = 0.53$ a $H' = 1.33$ para el rodal Cielito Azul, en San Dimas, Durango. De manera similar, Solís *et al.* (2006), registraron valores de $H' = 1.21$ y $H' = 0.72$ al evaluar el efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango.

El valor del índice de Margalef registrado en este estudio ($D_{MG} = 1.53$) es superior al hayado por Návar-Cháidez y González-Elizondo (2009), quienes registraron un valor de $D_{MG} = 1.04$ en un bosque templado de Durango. También es superior ($D_{MG} = 0.90$) al encontrado por Hernández *et al.* (2009; $D_{MG} = 0.90$) en un bosque templado de Chihuahua. De León-Mata *et al.* (2013) estudiaron la distribución de la vegetación a través de un transecto sobre la Sierra Madre Occidental de Durango y encontraron que el índice referente a riqueza específica de Margalef aumenta a los 2450 msnm, justo donde se presenta la zona de transición de los elementos vegetales con afinidad a ecosistemas templado húmedo y templado seco. La alta diversidad registrada en el predio se debe en gran medida a la variedad de climas existentes, en las que las temperaturas son menos extremas y se recibe una mayor humedad proveniente del pacífico (Delgado *et al.*, 2016).

CAPÍTULO II

ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CONTENIDO DE CARBONO EN UN BOSQUE DE CLIMA TEMPLADO-FRÍO DE DURANGO, MÉXICO

ESTIMATION OF VOLUME, BIOMASS AND CARBON CONTENT IN A FOREST OF TEMPERATE-COLD CLIMATE OF DURANGO, MEXICO



Fotografía de un bosque en el ejido La Victoria.

Manuscrito sometido el 18 de mayo de 2018. Aceptado el 27 de enero de 2019.
Revista Fitotecnia Mexicana.

CAPÍTULO II

ESTIMACIÓN DE VOLUMEN, BIOMASA Y CONTENIDO DE CARBONO EN UN BOSQUE DE CLIMA TEMPLADO -FRÍO DE DURANGO, MÉXICO

Resumen

La información sobre el volumen y la biomasa de los árboles es importante para determinar la retención de carbono de un bosque. En el presente estudio se estimó el volumen, biomasa y contenido de carbono de especies arbóreas en un bosque de Durango, México. Se establecieron nueve sitios de muestreo de 50 x 50 m (2 500 m²) y se realizó un censo de todas las especies arbóreas. Para cada uno de los árboles muestreados se registró la especie; se les midió el diámetro normal y la altura total. Para cada una de las especies se determinó su volumen y biomasa total árbol utilizando ecuaciones alométricas generadas por diferentes autores. Para determinar el contenido de Carbono se multiplicó el valor de la biomasa por el factor 0.5, ya que según resultados de muchos autores este valor representa la concentración de carbono promedio para coníferas y hojosas. En total se registraron 11 especies, cuatro géneros y cuatro familias. El bosque presenta una densidad de 575 árboles ha⁻¹, un volumen total de 207.36 m³ ha⁻¹ y una concentración de biomasa total de 130.28 Mg ha⁻¹. Con relación al carbono, se presentó un total de 65.14 Mg ha⁻¹. Las especies con mayor volumen, biomasa y carbono acumulado fueron *Pinus durangensis*, *P. cooperi* y *Quercus sideroxylla*. El área basal es la mejor variable indicadora del contenido de carbono en el área de estudio.

Palabras clave: *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi*, biomasa, carbono, ecuaciones alométricas, volumen.

Abstract

The information on the volume and biomass of the trees is important to determine the carbon sequestration of a forest. In the present study the volume, biomass and carbon content of tree species were estimated in a forest of Durango, Mexico. Establishment nine sampling sites of de 50 x 50 m (2 500 m²) and a census of all tree species was carried out. For each of the trees sampled, the species was recorded; the normal diameter and the total height were measured. For each of the species, the volume and total tree biomass were determined using allometric equations generated by different authors. To determine the carbon content, the value of the biomass was multiplied by the factor 0.5, since according to the results of many authors, this value represents the average carbon concentration for conifers and broadleaves. In total, 11 species, four genera and four families were registered. The forest has a density of 575 trees ha⁻¹, a total volume of 207.36 m³ ha⁻¹ and a total biomass concentration of 130.28 Mg ha⁻¹. Regarding carbon, a total of 65.14 Mg ha⁻¹ was presented. The species with the highest volume, biomass and accumulated carbon were *Pinus durangensis*, *P. cooperi* and *Quercus sideroxylla*. The basal area is the best indicator variable of the carbon content in the study area.

Index words: *Pinus durangensis*, *Pinus cooperi*, biomass, carbon, allometric equations volume.

Introducción

El calentamiento global es uno de los problemas ambientales más graves, el cual afecta los procesos atmosféricos y se manifiesta mediante variaciones climáticas. Este calentamiento es provocado por el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) hacia la atmósfera que se ha incrementado durante los últimos siglos (Garreaud, 2011, Vega, 2008).

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas que más contribuye al calentamiento global. Una forma de mitigar sus efectos es almacenarlo en la biomasa y en el suelo (a través de la acumulación de materia orgánica (Ávila *et al.*, 2001). Mediante la fotosíntesis, la vegetación forestal absorbe CO₂ durante su dinámica de crecimiento, es decir, fija el carbono para la composición de su estructura (tallos, ramas, hojas y raíces) y libera el oxígeno que proporciona un beneficio ambiental a todo el planeta (SEMARNAT, 2001).

Los ecosistemas forestales tienen un potencial importante para almacenar dióxido de carbono y pueden ser utilizados como un medio alternativo para compensar las emisiones actuales y futuras (Ni *et al.*, 2016, Stavins y Richards, 2005). La capacidad para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Fonseca, 2017, Schulze *et al.*, 2000). La información sobre la biomasa y el volumen de árboles es importante para señalar el papel que desempeñan los recursos forestales en el almacenamiento de carbono. La biomasa representa la cantidad potencial de carbono que puede ser liberado a la atmósfera, o conservado y fijado en una determinada superficie cuando los bosques son manejados para alcanzar los compromisos de mitigación de gases de efecto invernadero (Brown *et al.*, 1996). El volumen de las existencias en formación en el bosque disponible para abastecimiento de madera constituye también un indicador importante sobre el potencial (económico) del bosque (FAO, 1998). He aquí la importancia de cuantificar el contenido de volumen, biomasa y carbono en los ecosistemas forestales.

Para determinar el volumen de carbono almacenado en los ecosistemas forestales es fundamental establecer adecuadamente el contenido de la biomasa existente de los bosques. La estimación del volumen y biomasa en los árboles requiere de un estudio destructivo (Brown *et al.*, 1989), para luego proceder al ajuste de funciones o modelos que predicen el volumen y la biomasa del árbol en pie (Husch, 2001). Sin embargo, para evitar usar métodos destructivos se han generado diversas ecuaciones de volumen, las cuales son útiles para que junto

con los datos de inventarios forestales provean las existencias reales actuales, así como los rasgos dasométricos de las especies que componen los bosques (Clutter *et al.*, 1983). De la misma forma se han formulado ecuaciones de biomasa que junto con los datos de inventarios proporcionan información sobre el contenido de biomasa y cuando se multiplican por un factor proveen también los almacenes de carbono (Schroeder *et al.*, 1997, Clark *et al.*, 2001, Jenkins *et al.*, 2001, Návar, 2010). Generalmente los modelos de estimación de biomasa se ajustan para cada especie, aunque se han generado modelos que integran varias especies, debido a la similitud en los patrones de crecimiento en determinados ambientes (Iglesias y Barchuk, 2010, Rodríguez *et al.*, 2007).

En México se han generado diversos estudios que contemplan la estimación de volumen, biomasa y captura de carbono (Corral *et al.*, 1999; Contreras y Návar, 2002; Jaramillo *et al.*, 2003; Návar, 2005; Návar, 2009). Por ejemplo, Pimienta de la Torre *et al.* (2007), estimó el contenido de biomasa y carbono de *Pinus cooperi* en Durango. Nájera y Hernández (2009) determinaron la acumulación de biomasa en una localidad de Durango. Sin embargo, estas investigaciones son puntuales para algunas localidades específicas y aún existen muchas áreas sin evaluar. Por tal motivo el presente estudio tiene como objetivo estimar el volumen, biomasa y contenido de carbono de especies arbóreas en un bosque templado del noroeste de México, ya que esta información es de gran importancia para la cuantificación del dióxido de carbono (CO₂).

Materiales y métodos

Área de estudio

El presente estudio se realizó en el ejido La Victoria, ubicado al Suroeste del estado de Durango (oeste de México), en el municipio de Pueblo Nuevo. Está enmarcado geográficamente entre los paralelos 23° 40' 04" y 23° 47' 54" de latitud Norte y 105° 29' 52" de longitud Oeste (Figura 1).

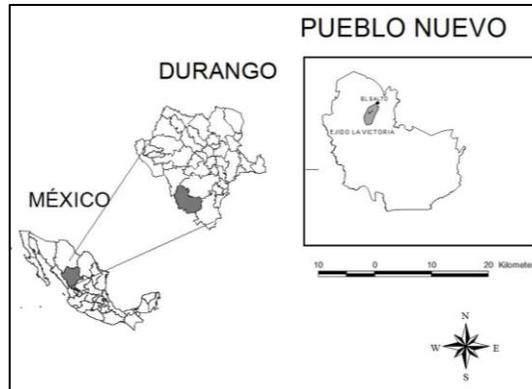


Figura 1. Localización del área de estudio.

El ejido La Victoria se encuentra ubicado en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Occidental, específicamente en la subprovincia de Gran Meseta y Cañones Duranguenses y Mesetas y Cañadas del Sur. El tipo de roca predominante es ígnea extrusiva ácida. De acuerdo con la carta edafológica del INEGI (1988), los suelos del predio son de tipo cambisol, regosol y litosol con textura predominantemente gruesa a media. La vegetación en la mayor parte del predio está formada por bosques de pino-encino, con distintas condiciones de productividad.

Análisis de la información

Los datos dasométricos para el estudio provinieron de nueve parcelas permanentes de muestreo establecidas en otoño de 2008, cuadrangulares de 2,500 m² (50 m x 50 m), siguiendo la metodología desarrollada por Corral-Rivas *et al.* (2009). La base de datos la constituyeron 1,294 árboles muestreados a los que se les midió el diámetro normal, la altura total y se registró la especie de cada individuo.

Para cada una de las especies se determinó su volumen individual utilizando la ecuación de Shumacher y Hall sugerida por Contreras y Nívar (1997), la cual se utiliza para estimar el volumen de las principales especies arbóreas en la Sierra Madre Occidental (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones para estimar volumen rollo total árbol de Shumacher y Hall (Contreras y Návar, 1997) para las especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.

Especie	Ecuación
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	$V=0.00024698*(DN^{1.6254})*(H^{0.8550})$
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schldl.	$V=0.00024698*(DN^{1.6254})*(H^{0.8550})$
<i>Pinus cooperi</i> C.E. Blanco.	$V=0.00004010*(DN^{1.9515})*(H^{0.9786})$
<i>Pinus durangensis</i> Martínez.	$V=0.00001771*(DN^{2.1441})*(H^{1.0383})$
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schldl. & Cham.	$V=0.00006815*(DN^{1.8346})*(H^{0.9319})$
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schldl. & Cham.	$V=0.00035377*(DN^{1.4896})*(H^{0.8052})$
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	$V=0.00024732*(DN^{1.6169})*(H^{1.0941})$
<i>Quercus sideroxyla</i> Bonpl.	$V=0.00024732*(DN^{1.6169})*(H^{1.0941})$
Otras hojosas (<i>Arbutus bicolor</i> S. González, <i>A. madrensis</i> S. González y <i>A. xalapensis</i> Kunth).	$V=0.00024732*(DN^{1.6169})*(H^{1.0941})$

V: Volumen ($m^3 ha^{-1}$); DN: Diámetro normal (m); H: Altura total (m).

Para cada una de las especies se determinó su biomasa total árbol utilizando las ecuaciones alométricas generadas por diferentes autores (Tabla 2).

Tabla 2. Ecuaciones para estimar la biomasa para diferentes especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.

Especie	Ecuación	Autor
<i>Juniperus deppeana</i> *	$B=Exp(-1.6469)*(DN^2.1255)$	Rodríguez <i>et al.</i> , 2007
<i>Pinus ayacahuite</i>	$B=Exp(-3.066)*(DN^2.646)$	Návar, 2010
<i>Pinus cooperi</i>	$B=Exp(-1.922)*(DN^2.321)$	Návar, 2010
<i>Pinus durangensis</i>	$B=Exp(-2.108)*(D^2.373)$	Návar, 2010
<i>Pinus leiophylla</i>	$B=Exp(-3.549)*(DN^2.787)$	Návar, 2010
<i>Pinus teocote</i>	$B=Exp(-3.182)*(DN^2.702)$	Návar, 2010
<i>Quercus crassifolia</i>	$B=(0.283)*((DN^2)*H)^{0.807}$	Ayala, 2001
<i>Quercus sideroxyla</i>	$B=Exp(-2.592)*(DN^2.585)$	Návar, 2010
Otras hojosas (<i>Arbutus bicolor</i> , <i>A. madrensis</i> y <i>A. xalapensis</i>)	$B=0.3764*(DN^2-2.3146)*(DN-1.9106)$	Aguilar <i>et al.</i> , 2016

B: Biomasa ($t ha^{-1}$); D: Diámetro (m); H: Altura total. * Corresponde a *Juniperus flaccida*.

Para determinar el contenido de Carbono se multiplicó el valor de la biomasa por el factor 0.5. El factor 0.5 representa la concentración de carbono promedio para coníferas y hojosas (Hamburg, 2000, Díaz *et al.*, 2007); valor citado en los inventarios de Gases de Efecto Invernadero, sector forestal para México (IPCC, 2005).

Resultados y discusión

Se registraron 11 especies arbóreas, cuatro géneros y cuatro familias. La familia más representativa fue Pinaceae con cinco especies, seguida de las familias Ericaceae y Fagaceae con tres y dos especies cada una. Estas tres familias incluyeron tres géneros y 10 especies, lo que constituye 90.78% de la vegetación registrada en las nueve parcelas de muestreo (Tabla 3). Esta información coincide con diversos estudios en los que se ha reportado a la familia Pinaceae como la más representativa en este tipo de bosque de la Sierra Madre Occidental (SMO) (González *et al.*, 1993; Márquez y González, 1998; Aragón *et al.*, 2010).

Tabla 3. Nombre científico, género y familia de las especies registradas en el área de estudio (ordenadas alfabéticamente por nombre científico).

Nombre científico	Género	Familia
<i>Arbutus bicolor</i> S. González	<i>Arbutus</i>	Ericaceae
<i>Arbutus madrensis</i> S. González	<i>Arbutus</i>	Ericaceae
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	<i>Arbutus</i>	Ericaceae
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	<i>Juniperus</i>	Cupressaceae
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltld.	<i>Pinus</i>	Pinaceae
<i>Pinus cooperi</i> C. E. Blanco	<i>Pinus</i>	Pinaceae
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	<i>Pinus</i>	Pinaceae
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltld. & Cham.	<i>Pinus</i>	Pinaceae
<i>Pinus teocote</i> Schied. ex Schltld. & Cham.	<i>Pinus</i>	Pinaceae
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	<i>Quercus</i>	Fagaceae
<i>Quercus sideroxylo</i> Bonpl.	<i>Quercus</i>	Fagaceae

La masa arbórea estudiada presentó un total de 575 árboles·ha⁻¹. La especie *Pinus cooperi* se presentó en todos sitios de muestreo y obtuvo la mayor abundancia con 189 árboles·ha⁻¹ (34.84%), seguida de *P. durangensis* y *Quercus sideroxylo* con 144 árboles·ha⁻¹ (24.96%) y 104 (18.16%) árboles·ha⁻¹ respectivamente, estas especies se presentaron casi en todos los sitios de muestreo (excepto en el 1 y 8). La especie que menor cantidad de árboles presentó fue *Q. crassifolia*, con cuatro árboles·ha⁻¹ (0.62%) y solo se registró en el sitio 7 (Tabla 4). Valenzuela y Granados (2009) reportaron a *P. durangensis* como la especie más abundante en los bosques templados de Durango. De la misma forma, *P. durangensis* junto con *Q. sideroxylo* han sido reportadas como unas de las especies más frecuentes en la sierra madre occidental (Silva-Flores, 2014).

Tabla 4. Distribución de árboles (por hectárea) por especies en los sitios de muestreo.

Especie	Sitio									Total (árboles ha ⁻¹)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
<i>Pinus cooperi</i>	36	1	10	4	6	4	1	40	88	189
<i>Pinus durangensis</i>		24	70	6	8	19	15		3	144
<i>Quercus sideroxyla</i>		32	13	24	5	16	2		12	104
<i>Juniperus deppeana</i>	4	1		6	10	6	0	23	2	53
<i>Pinus ayacahuite</i>		6	4	2	4	14	0		2	32
<i>Pinus teocote</i>		1	10	3	2	8			2	27
Otras hojosas		1	4	5		2	3		1	17
<i>Pinus leiophylla</i>		4			1					5
<i>Quercus crassifolia</i>							4			4
Total	40	70	111	50	36	69	25	63	110	575

La altura de las especies encontradas en el área de estudio oscila entre 2.5 y 38.8 metros, siendo la altura promedio 11.7 metros, sin embargo, la mayoría de las especies se encuentran en un rango de altura de 7.5 a 25 metros. El sitio 5 presenta la mayor variabilidad de alturas, mientras que el 50% los individuos del sitio 7 presentan las mayores alturas en comparación con los demás sitios, sin embargo, el sitio 4 y 6 presentan el mayor número de valores atípicos (Figura 2a). La especie *Pinus cooperi* y *P. durangensis* registraron valores atípicos arriba de 20 metros, pero *P. durangensis* presentó la mayor variabilidad de alturas y la mayor parte de sus individuos tienden a ser más altos. Los individuos de la especie *Juniperus deppeana* presentan las alturas más bajas. La especie con el promedio de altura más alto fue *Quercus crassifolia* con 16.84 metros de altura, seguida de *P. durangensis* con 15.84 metros, *P. teocote* con 13.74 metros, *P. ayacahuite* con 12.48 y *P. leiophylla* con 10.46 metros. Las demás especies presentaron una altura menor a 10 metros (Figura 2a). En un estudio para la construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *P. cooperi* blanco se encontró que la altura media es 20.5 con máximo de 30.0 y mínimo de 10.3 metros (Vargas *et al.*, 2010). Otro estudio reporta la altura promedio de 9.4 metros en un área en etapa de regeneración (Montes de Oca *et al.*, 2009).

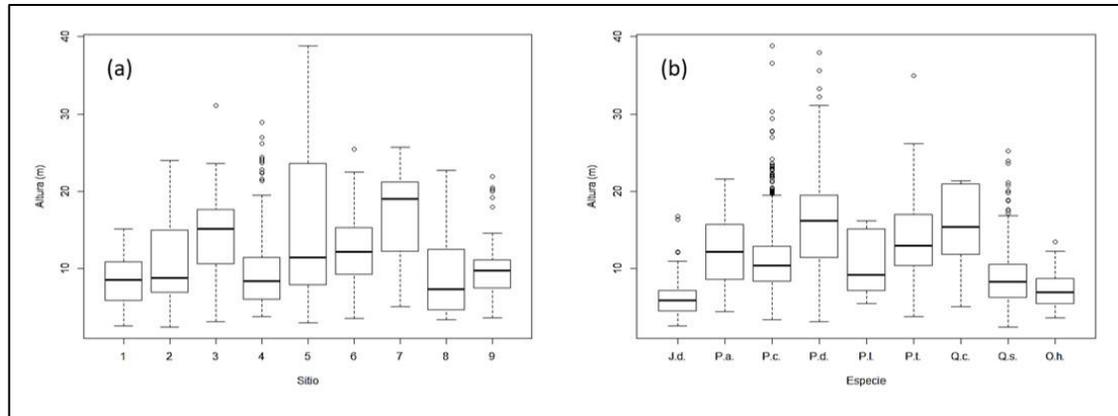


Figura 2. Distribución de la altura por sitio (a) y distribución de la altura por especie (b). J.d.: *Juniperus deppeana*; P.a.: *Pinus ayacahuite*; P.c.: *P. cooperi*; P.d.: *P. durangensis*; P.l.: *P. leiophylla*; P.t.: *P. teocote*; Q.c.: *Quercus crassifolia*; Q.s.: *Q. sideroxylla*; O.h.: Otras hojosas.

El diámetro de los árboles registrados oscila entre 6.5 y 60 cm, siendo el diámetro promedio 19.4 cm. En el sitio 5 se registró la mayor variabilidad, mientras que en el sitio 7 el 50% de los árboles presentan los mayores diámetros. En todos los sitios se presentaron datos atípicos sin embargo el sitio 5 y 7 se registraron valores de hasta 81.3 cm (Figura 3a). Las especies *Quercus crassifolia* y *Pinus durangensis* presentaron la mayor variabilidad de diámetros, pero la especie *P. durangensis* junto con *P. cooperi* presentaron el 50% de sus individuos con el mayor diámetro. Más del 50% de los árboles de *Juniperus deppeana* y *P. leiophylla* presentaron diámetros menores al promedio (Figura 3b). En un estudio para la construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *P. cooperi* se encontró que el diámetro medio es 19.1 con máximo de 30.0 y mínimo de 5.8 cm (Vargas *et al.*, 2010). Otro estudio reporta el diámetro promedio de 3.6 cm en un área en etapa de regeneración (Montes de Oca *et al.*, 2009). El diámetro normal y altura total de los árboles son de gran importancia como variables predictoras para estimar el carbono en la parte aérea de los bosques (Pacheco *et al.*, 2007).

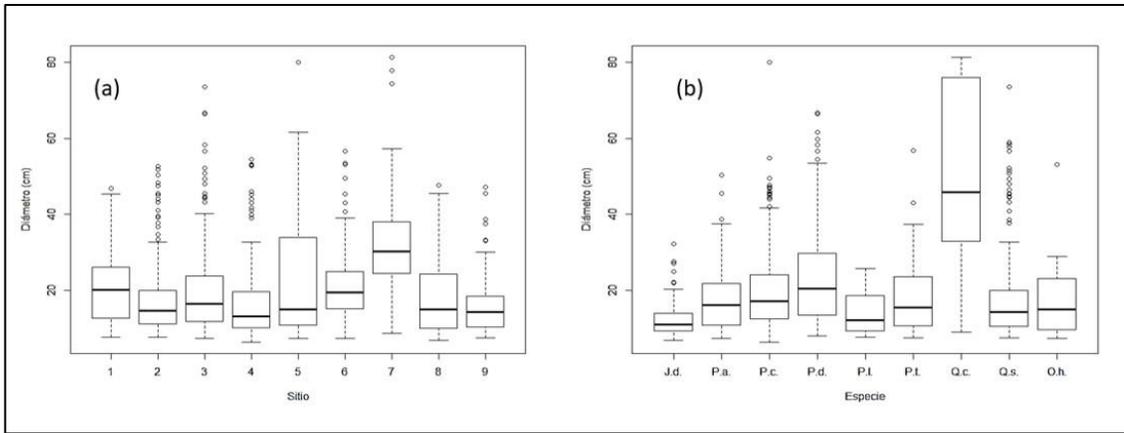


Figura 3. Distribución de diámetro por sitio (a) y distribución del diámetro por especie (b). J.d.: *Juniperus deppeana*; P.a.: *Pinus ayacahuite*; P.c.: *P. cooperi*; P.d.: *P. durangensis*; P.l.: *P. leiophylla*; P.t.: *P. teocote*; Q.c.: *Quercus crassifolia*; Q.s.: *Q. sideroxylla*; O.h.: Otras hojosas.

El área estudiada presenta un volumen total de 207.36 m³ ha⁻¹, en donde la especie *Pinus durangensis* obtuvo el mayor volumen con 68 m³ ha⁻¹ (33%), seguida por *Quercus sideroxylla* con 54 m³ ha⁻¹ (26%) y *P. cooperi* con 44 m³ ha⁻¹ (21%). La especie *P. leiophylla* presentó el menor volumen con 0.6 m³ ha⁻¹ (0.3%) (Figura 4). Estas existencias son altas en comparación con los 115 m³ ha⁻¹ registradas por Nívar (2010) para los bosques de templados de estado de Nuevo León, México. Según Nívar y González (2009), la productividad o incremento en volumen, aumenta con el índice de mezcla de pinos y encinos, y por el aumento en la densidad.

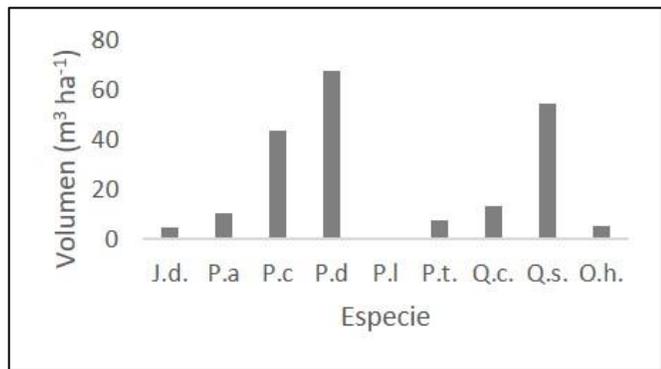


Figura 4. Contenido de volumen por especie. J.d.: *Juniperus deppeana*; P.a.: *Pinus ayacahuite*; P.c.: *P. cooperi*; P.d.: *P. durangensis*; P.l.: *P. leiophylla*; P.t.: *P. teocote*; Q.c.: *Quercus crassifolia*; Q.s.: *Q. sideroxylla*; O.h.: Otras hojosas.

Con relación a la biomasa, se presentó un total de 130.28 Mg ha⁻¹ de las cuáles 45 Mg ha⁻¹ (35%) corresponden a *Pinus durangensis*, 38 Mg ha⁻¹ (29%) a *P. cooperi* y 27 Mg ha⁻¹ (20%) a *Quercus sideroxylla*. *P. leiophylla* presentó el menor contenido de biomasa con 0.4 Mg ha⁻¹ (0.3%) (Figura 5). Najera y Hernández (2009) encontraron que la acumulación anual de la biomasa aérea para la región del Salto Durango es de 4 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Návar (2009) estimó las reservas de carbono para bosques del noroeste de México y encontró que el contenido de biomasa en la zona centro sur de la Sierra Madre Occidental del estado de Durango presentan 130 Mg ha⁻¹, valor similar al registrado en este estudio. Este valor es alto en comparación con la densidad de biomasa aérea promedio para los bosques templados del estado de Nuevo León y los bosques tropicales secos de Sinaloa, México, que reportan valores de 74.16 Mg ha⁻¹ y 73 Mg ha⁻¹ respectivamente (Návar, 2009; Návar, 2010). Jaramillo *et al.* (2003) también registraron valores bajos de 94-124 Mg ha⁻¹ para un bosque tropical del centro de México. Sin embargo, la densidad de biomasa reportada para bosques tropicales es mayor, registrándose valores de 225 Mg ha⁻¹ para la Península de Yucatán y 265 Mg ha⁻¹ para Veracruz (Cairns *et al.*, 2000).

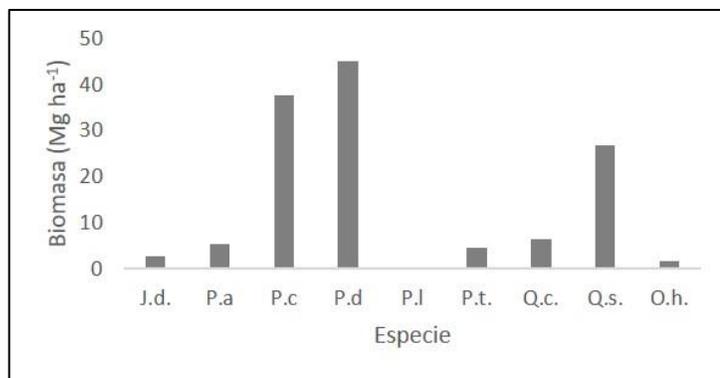


Figura 5. Contenido de biomasa por especie. J.d.: *Juniperus deppeana*; P.a.: *Pinus ayacahuite*; P.c.: *P. cooperi*; P.d.: *P. durangensis*; P.l.: *P. leiophylla*; P.t.: *P. teocote*; Q.c.: *Quercus crassifolia*; Q.s.: *Q. sideroxylla*; O.h.: Otras hojosas.

Con relación al carbono, se presentó un total de 65.14 Mg ha⁻¹ de las cuáles 22 Mg ha⁻¹ (35%) corresponden a *Pinus durangensis*, 19 Mg ha⁻¹ (29%) a *P. cooperi* y 13 Mg ha⁻¹ (20%) a *Quercus sideroxylla*. *P. leiophylla* presentó menor carbono con 0.2 Mg ha⁻¹ (0.3%) (Figura 6). Silva y Návar, (2009) reportaron a *P. durangensis* como una de las especies con mayor concentración de carbono. La diferencia en los valores obtenidos del contenido de carbono promedio para los géneros *Pinus* spp y *Quercus* spp concuerda con lo descrito en la literatura científica, donde se reporta que el contenido de carbono en coníferas es más alto que en latifoliadas (Gracia *et al.*, 2004, Silva y Návar, 2009). Esta información es similar a la registrada por Návar (2009), quien menciona que utilizando el factor de carbono de 0.50, los bosques templados en los bosques de Durango tienen un 65 Mg ha⁻¹ y para los bosques tropicales secos del estado de Sinaloa 36,5 Mg ha⁻¹, información obtenida al utilizar los datos del inventario forestal para estimar las reservas de biomasa y carbono para bosques templados de Durango y Chihuahua y bosques tropicales secos de Sinaloa, México.

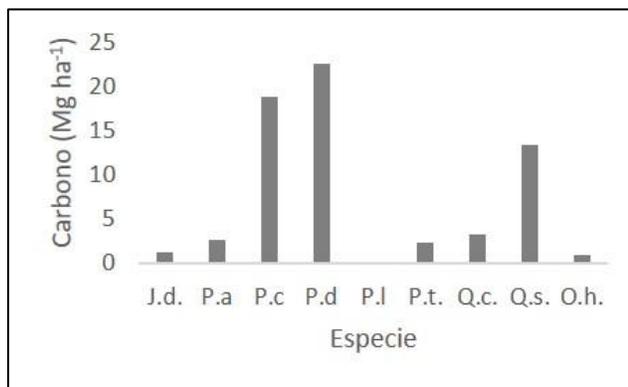


Figura 6. Contenido de carbono por especie. J.d.: *Juniperus deppeana*; P.a.: *Pinus ayacahuite*; P.c.: *P. cooperi*; P.d.: *P. durangensis*; P.l.: *P. leiophylla*; P.t.: *P. teocote*; Q.c.: *Quercus crassifolia*; Q.s.: *Q. sideroxylla*; O.h.: Otras hojosas.

El área basal resulto ser la mejor variable indicadora del contenido de carbono en el área de estudio, ya que, como se puede observar en la Figura 7, conforme aumenta el área basal aumenta el valor del carbono (tendencia lineal) obteniendo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.924$. Para otras variables, como el diámetro cuadrático y número de individuos, el valor resulto ser bajo ($R^2 < 0.16$).

Lo anterior es muy similar a lo obtenido por Acosta-Mireles *et al.* (2009), quienes además mencionan que el área basal es un indicador de la densidad y mientras mayor densidad muestre un rodal, más se incrementa su cantidad de biomasa y Carbono.

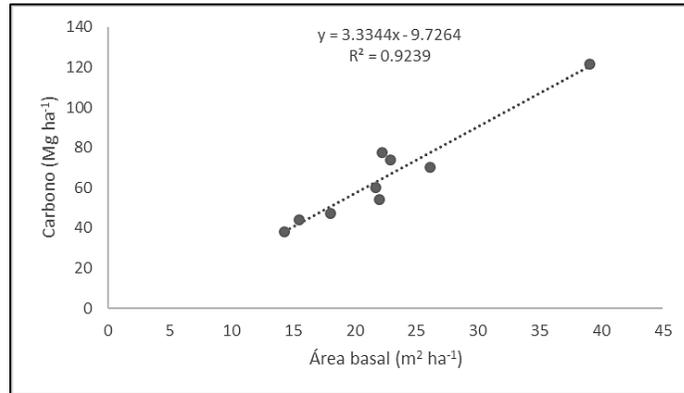


Figura 7. Relación área basal con el contenido de carbono.

CAPÍTULO III
COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ESTRATO ARBÓREO
BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN UN
ECOSISTEMA FORESTAL DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL
(MÉXICO)

STRUCTURE AND COMPOSITION OF TREE STRATA UNDER
DIFFERENT SILVICULTURAL TREATMENTS IN A FOREST
ECOSYSTEM OF THE SIERRA MADRE OCCIDENTAL (MEXICO)



Fotografía de un bosque bajo aprovechamiento forestal.

Manuscrito sometido a Journal of Forestry Research (JFR) el 17 de diciembre de 2018.

CAPÍTULO III

COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ESTRATO ARBÓREO BAJO DIFERENTES TRATAMIENTOS SILVÍCOLAS EN UN ECOSISTEMA FORESTAL DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL (MÉXICO)

Resumen

El presente estudio evaluó la estructura espacial del estrato arbóreo con diferentes tratamientos silvícolas en la Sierra Madre Occidental (corta de regeneración [sitio 1] y corta de selección [sitio 2]). Los sitios de muestreo son de 2,500 m² (50 m x 50 m), dentro de los cuales se realizó un censo de todas las especies arbóreas ($d_{1.30\text{ m}}$) mayor o igual que 7.5 cm. A cada individuo se le hicieron mediciones dasométricas de altura total (h), diámetro a la altura del pecho ($d_{1.30\text{ m}}$), azimut, distancia del punto central y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo. Para cada sitio se determinó el número de árboles por hectárea (N), área basal por hectárea (G) así como el grado de agregación, mezcla y diferenciación. En total se registraron seis y siete especies para los sitios uno y dos y una densidad de 632 n ha⁻¹ y 760 n ha⁻¹, un área basal de 16.18 m² ha⁻¹ y 23.18 m². Los valores promedio por sitio para el grado de agregación, mezcla y diferenciación fueron: Agregación $Wi_1 = 0.52$, $Wi_2 = 0.54$; Mezcla $Mi_1 = 0.81$ y $Mi_2 = 0.57$; diferenciación diamétrica $TDi_1 = 0.33$ y $TDi_2 = 20.3$; diferenciación en altura $THi_1 = 0.34$ y $THi_2 = 0.32$; dominancia diamétrica $Ui_1 = 0.47$ y $Ui_2 = 0.52$; dominancia de altura $UHi_1 = 0.46$ y $UHi_2 = 0.48$. El sitio con cortas de regeneración presentó mayor número de especies y grado de mezcla. El sitio con cortas de selección presentó mayor diferenciación en diámetros y alturas.

Palabras clave: corta de regeneración, corta de selección, distribución espacial de árboles, mezcla, diferenciación de tamaño.

Abstract

The present study evaluated the spatial structure of the tree stratum of two sites treated with different silvicultural treatments in the Sierra Madre Occidental (Regeneration cut [Site 1] and Selection cut [Site 2]). The sampling sites are of 2,500 m² (50 m x 50 m) in size, and a census of all trees with a diameter at breast height ($d_{1.30\ m}$) greater or equal than 7.5 cm was carried out in both sites. Among other variables, tag number, species code, breast height diameter, total tree height, azimuth ($^{\circ}$) and radius from the centre of the plot of all trees equal or greater than 7.5 cm in diameter were recorded. For each site, the number of trees per hectare (N), basal area per hectare (G) as well as grade of aggregation, mingling, and size differentiation were analyzed. In total, six and seven tree species were recorded for sites one and two, respectively, and a density of 632 stems ha⁻¹ and 760 stems ha⁻¹, a basal area of 16.18 m² ha⁻¹ and 23.18 m² ha⁻¹. The mean values of the grade of aggregation, mingling and size differentiation were: Aggregation $Wi_1 = 0.52$ and $Wi_2 = 0.54$; Mingling $Mi_1 = 0.8$ and $Mi_2 = 0.57$; $TDi_1 = 0.33$ and $TDi_2 = 20.36$; Differentiation in height $THi_1 = 0.34$ and $THi_2 = 0.32$, diameter dominance $Ui_1 = 0.47$ and $Ui_2 = 0.52$; Height dominance $UHi_1 = 0.46$ and $UHi_2 = 0.48$. The site with regeneration cut presents a greater number of species and a greater degree of mix. The site with selection cut presents greater differentiation in diameters and heights.

Keywords: regeneration cut, selection cut, tree spatial distribution, mingling, size differentiation.

Introducción

La Sierra Madre Occidental (SMO) es el complejo montañoso más largo y continuo de México. Tiene una superficie de 251 648 km² y se extiende por casi 1,200 km desde el noreste de Sonora hasta el norte de Jalisco (González-Elizondo *et al.*, 2012). Este sistema es particularmente rico por tener la mayor superficie con bosques templados en el país, así como por la agrupación en su territorio de floras de diversos orígenes y por su gran variedad de hábitats. En esta región se presenta la mayor diversidad de asociaciones de pinos, encinos y madroños a nivel mundial (González-Elizondo *et al.*, 2012).

La diversidad de especies y la complejidad estructural hacen que los bosques sean más productivos (Hiura, 2001; Ishii *et al.*, 2004; Vilá *et al.*, 2007; Hui y Pommerening, 2014). El diámetro medio, la distribución diamétrica, la altura, la densidad y la competencia entre individuos son importantes características de la estructura que varían en función de las especies del estrato arbóreo, las condiciones ecológicas del sitio y del tratamiento silvícola (Berger y Puettmann, 2000, Del rio *et al.*, 2013). La diversidad estructural puede ser caracterizada mediante la utilización de diferentes índices (Gadow, 1999, Pommerening, 2002) que pueden usarse para evaluar el efecto del aprovechamiento forestal sobre las especies arbóreas del bosque, controlar los cambios provocados por los tratamientos silvícolas o para definir las prácticas que conduzcan a alcanzar un manejo forestal sustentable (Corral *et al.*, 2005; Aguirre *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013).

La composición y la estructura de los bosques son comúnmente manipuladas mediante la aplicación de tratamientos silvícolas (Pretzsch, 1998; Del Río *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2006). Esto con el propósito de producir madera y otros productos forestales, ya que se trata de mejorar el crecimiento de árboles seleccionados y de asegurar su regeneración (Crow *et al.*, 2002; Nauertz *et al.*, 2004).

En los bosques de la SMO se aplican diferentes sistemas silvícolas entre los cuales destacan el Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI) que tiene las cortas selectivas como principal tratamiento silvícola y el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), el cual se basa en la aplicación de los tratamientos silvícolas: aclareos, cortas de regeneración, y cuando la masa lo requiere, una corta de liberación con preaclareo (Hernandez-Diaz *et al.*, 2008).

En México se han realizado diversas investigaciones que evalúan los efectos del manejo forestal en la composición y diversidad de especies en los bosques (Corral *et al.*, 2005; Solís *et al.*, 2006; Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008; Leyva *et al.*, 2010). El presente estudio tiene como objetivo evaluar la composición y estructura del estrato arbóreo de dos sitios ante la aplicación de diferentes tratamientos silvícolas.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el ejido La Campana, ubicado al Sudoeste del estado de Durango, en el municipio de Pueblo Nuevo. Está enmarcado geográficamente entre los paralelos 23° 42' 34.48" y 23° 49' 28.18" y de latitud Norte y los meridianos 105° 30' 11.83" y 105° 40' 6.56" de longitud Oeste. El clima predominante en la zona es generalmente templado, con lluvias en verano. La precipitación media anual oscila entre 443 y 1452 mm y la temperatura media anual entre 8 y 26 °C (Silva-Flores *et al.*, 2014) (Figura 1).



Figura 1. Localización del área de estudio.

Los datos provienen de dos sitios permanentes de muestreo de 2,500 m² (50x50 m) establecidas en el otoño de 2007. Cada sitio presenta diferente tratamiento silvícola; corta de regeneración (Sitio 1) y corta de selección (Sitio 2).

La corta de regeneración es la corta principal del MDS, que consiste en aprovechar los árboles que han llegado a su madurez, seleccionando por sus características externas los mejores individuos para dejarlos en pie como árboles padres o semilleros. La corta de selección es el único tratamiento del MMOBI, consiste en la remoción del arbolado más grande y viejo (o sea, aquellos que van alcanzando el turno), ya sea en forma individual o por grupos pequeños, a intervalos constantes, repetidos indefinidamente, con el objeto de permitir la regeneración continua y mantener el estado incoetáneo de las masas. (Hawley y Smith, 1982).

La base de datos la constituyeron 348 árboles muestreados a los que se les midió el diámetro normal ($d_{1.30}$), la altura total (h), distancia, azimut y se registró la especie a la que pertenecía cada individuo.

Para la estimación de los parámetros estructurales se utilizaron índices de relaciones de vecindad y descripción del patrón de puntos en el espacio (Gadow *et al.*, 2007). Se utilizó el método de muestreo estructural de los cinco árboles, desarrollado para evaluar los atributos estructurales de los árboles que forman

una masa forestal (Gadow *et al.*, 2001; Aguirre *et al.*, 2003). Para cada sitio se determinó lo siguiente:

Número de árboles por hectárea (N)

$$N = \frac{10000 * n}{s}$$

donde N es la densidad en árboles por hectárea, S (m^2) es la superficie de los sitios y n es el número de árboles de los sitios.

Área basal por hectárea (G)

$$G = \frac{\pi}{4} * \sum_{i=1}^n d_i^2 * \frac{10000}{s}$$

donde G es el área basal (m^2 ha), d_i el diámetro normal, en m^2 de cada árbol, y S es la superficie del sitio (m^2).

Índice de uniformidad de Gadow (W_i)

Este índice describe la regularidad o la irregularidad de la distribución del arbolado (Aguirre, 2004; Gadow *et al.*, 2007; Pommerening, 2002). Se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos a un árbol de referencia i y su comparación con un ángulo estándar α , de tal manera que al considerar cuatro vecinos al árbol de referencia W_i puede tomar valores de 0 hasta 1, donde un valor cercano a cero representa condiciones de regularidad, valores cercanos a 0.5 muestran tendencia a la aleatoriedad y los próximos a 1 presentan condiciones de agrupamiento. En este estudio se consideró un valor de referencia al ángulo estándar α , que se esperaría en una distribución regular = 72° comparado con cada α_j . El índice de ángulos se calcula con la siguiente ecuación (Gadow *et al.*, 1998):

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

donde: W_i = valor del índice para el j -ésimo árbol referencia, n = es el número de árboles vecinos considerados, V_{ij} = variable 1 cuando el j -ésimo ángulo α entre dos árboles vecinos próximos es menor o igual al ángulo estándar α , en caso contrario toma un valor de 0.

Índice de mezcla de especies (M_i)

Es una medida de la diversidad en la distribución espacial de especies es el grado de mezcla entre estas, el cual se puede estimar mediante el índice de mezcla M_i de Földner (1995), el cual se define como la proporción de n vecinos más cercanos que no pertenecen a la misma especie que el árbol de referencia, en este caso se toman los 4 vecinos más cercanos.

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 - V_{ij})$$

donde $0 \leq M_i \leq 1$, v_j es igual a 0 cuando el árbol j es de la misma especie que el árbol de referencia i y será 1 en caso contrario (Gadow *et al.*, 2007).

Estructura dimensional (TD_i y TH_i)

Este índice permite describir la heterogeneidad dentro de la estructura del ecosistema, teniendo como base las relaciones dasométricas de las especies próximas (Pommerening, 1997; Jiménez *et al.*, 2001; Corral *et al.*, 2005). En este caso se utilizará para diámetros y alturas. Un valor de cero corresponde a una situación donde los árboles presentan la misma dimensión. El valor se incrementa al aumentar la diferencia media del tamaño de los árboles vecinos. Se describen con las siguientes ecuaciones matemáticas (Gadow, 1993; Del Río *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005):

$$TD_{(i)} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{n} \sum_n \left(1 - \frac{d \min}{d \max} \right)$$

$$TH_{(i)} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{1}{n} \sum_n \left(1 - \frac{h \min}{h \max} \right)$$

donde $TD_{(i)}$ y $TH_{(i)}$ = diferenciación diamétrica y en altura del área i ; n = número de vecinos considerados; N = número de árboles medidos; d_{min} , d_{max} = diámetro menor y mayor entre i y cada uno de sus n vecinos; h_{min} , h_{max} = altura menor y mayor entre i y cada uno de sus n vecinos. El grado de diferenciación en diámetros y alturas se clasifica en cinco grupos, de 0.0-0.2=débil; 0.2-0.4=moderada; 0.4-0.6 clara; 0.6-0.8 fuerte; 0.8-1.0 muy fuerte (Aguirre *et al.*, 1998; Jiménez *et al.*, 1998),

Índice de dominancia (U_i)

Este índice también es conocido como medida de entorno y describe la dominancia relativa de una especie en su entorno directo. Se define como la dominancia del árbol referencia i con respecto a sus vecinos más cercanos, es decir, la proporción de árboles n más pequeños (en diámetro o altura) que el árbol de referencia.

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$$

donde $0 \leq U_i \leq 1$ y v_j será igual a 1 si el árbol j es menor al árbol referencia i , y 0 en caso contrario. Con cuatro vecinos U_i puede tener cinco valores, que corresponden a las clases sociales propuestas por Kraft (1884): $U_i = 0.0$, si los cuatro vecinos son más grandes que el árbol referencia i (suprimido); $U_i = 0.25$, si tres de los vecinos son más grandes (intermedio); $U_i = 0.50$, si dos de los vecinos son más grandes (codominante); $U_i = 0.75$, si uno de los cuatro vecinos es más grande (dominante); y $U_i = 1$, si ninguno de los cuatro vecinos es más grande que el árbol de referencia i (muy dominante).

Para evitar el efecto de borde se utilizó el estimador NN1. El cual consiste en omitir como árbol de referencia (i) a aquellos cuya distancia a su j -ésimo vecino más cercano sea menor a la distancia entre este y el borde de, no obstante, esto no los omite de formar parte de otros grupos.

Para el cálculo de los diversos índices se usó el programa CRANCOD v 1.4 (POMMERENING, 2012) así como adaptaciones de algunos *scripts* aportados por el mismo autor para el programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2011). Los gráficos y los análisis estadísticos se han realizado con los programas R v 3.3.2.

Resultados y discusión

Los tratamientos silvícolas provocan cambios en la estructura del bosque, promueven el establecimiento de la regeneración y aumentan el crecimiento de las dimensiones de los árboles en función del bienestar económico. En la figura 2 se observa la distribución espacial del arbolado del tratamiento de regeneración (S1) y del tratamiento de selección (S2). Con el estimador NN1 se omitieron aquellos árboles que se encontraban en el borde, de esta forma en el análisis de los índices de vecindad por sitio, para el S1 se utilizaron un total de 120 grupos estructurales de los cinco árboles y para el S2 un total de 167.

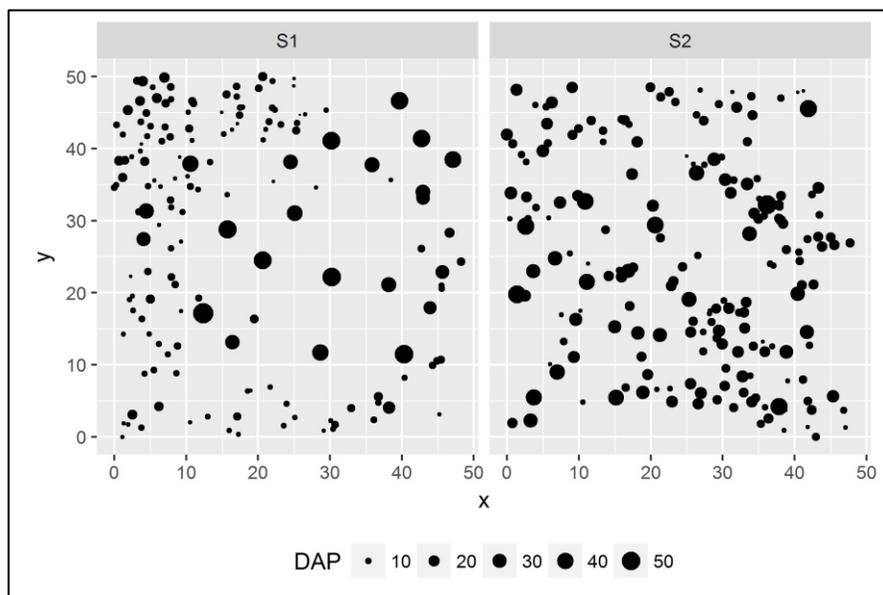


Figura 2. Distribución espacial del arbolado por sitio; los ejes “x” y “y” indican la distancia en metros. Los círculos representan los árboles, cuyo tamaño está escalado al diámetro normal.

En total se registraron ocho especies arbóreas distribuidas en los dos sitios de muestreo. *Alnus firmifolia* solo se encuentra en el S1, *Juniperus deppeana* y *Pinus ayacahuite* solo se presentan en el S2, las demás especies están presentes en ambos sitios. En el S1 se registraron seis especies arbóreas, las cuales suman una densidad de 632 n ha⁻¹ y 16.18 m² ha⁻¹ de área basal. La especie *Pinus durangensis* es la más abundante (224 n ha⁻¹) seguida de *Alnus firmifolia* (148 n ha⁻¹) y *Pinus teocote* (96 n ha⁻¹). En el S2 se encontraron siete especies arbóreas sumando una densidad de 760 n ha⁻¹ y 23.18 m² ha⁻¹ de área basal. *P. durangensis* es la más abundante (468 n ha⁻¹) seguida de *Q. sideroxylla* (148 n ha⁻¹) y *P. teocote* (60 n ha⁻¹). *P. durangensis* y *Q. sideroxylla* han sido reportadas como unas las especies más abundantes y como las que ocupan mayor área basal en los bosques de la Sierra Madre Occidental con valores superiores a 100 n ha⁻¹ y 10 m² ha⁻¹. (Valenzuela y Granados, 2009; Graciano-Ávila *et al.*, 2017).

Tabla 1. Número de árboles por hectárea (N) y área basal por hectárea (G) en los sitios de muestreo.

ESPECIE	S1		S2	
	N n ha ⁻¹	G m ² ha ⁻¹	N n ha ⁻¹	G m ² ha ⁻¹
<i>Arbutus bicolor</i>	64	0.68	20	0.12
<i>Alnus firmifolia</i>	148	1.53	-	-
<i>Juniperus deppeana</i>	-	-	4	0.07
<i>Pinus ayacahuite</i>	-	-	36	0.43
<i>Pinus cooperi</i>	12	0.07	24	0.31
<i>Pinus durangensis</i>	224	11.78	468	13.18
<i>Pinus teocote</i>	96	0.79	60	1.65
<i>Quercus sideroxylla</i>	88	1.33	148	7.42
TOTAL	632	16.18	760	23.18

Se presentó una distribución de frecuencias de tipo “J” invertida en ambos sitios, donde disminuye el número de árboles a medida que aumenta el diámetro. Esta condición comúnmente se presenta en bosques que han sido perturbados y es muy similar a lo registrado por López-Hernández *et al.* (2017), quienes encontraron una mayor cantidad de individuos en las categorías diamétricas menores y una disminución del número de árboles conforme aumenta la categoría diamétrica en un bosque de Puebla, México. Sin embargo, en el S1 se observa una mayor densidad de árboles en las clases diamétricas menores, con una disminución abrupta de densidad a medida que el diámetro se incrementa.

Para el caso del S2 la mayor densidad también se encuentra en las clases diamétricas menores, pero con una disminución gradual de densidad de árboles a medida que el diámetro se incrementa (Figura 3).

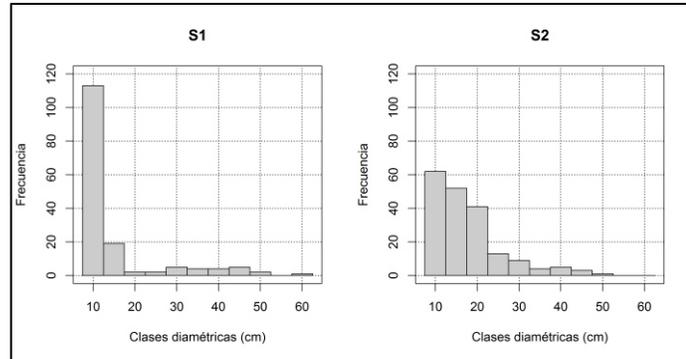


Figura 3. Distribuciones diamétricas por sitio.

Índice de uniformidad de Gadow (W_i).

Los valores para este índice fueron: $W_i = 0.52 \pm 0.20$ para S1 y $W_i = 0.54 \pm 0.22$ para S2. (Tabla 2). Valores menores a 0.475 sugieren una distribución regular y aquellos mayores a 0.517 una distribución irregular con tendencia a la formación de grupos (Hui y Gadow, 2002). De acuerdo con lo anterior en ambos sitios los valores obtenidos indican una distribución irregular con tendencia a la agrupación. La tendencia a la agrupación se da como consecuencia de la presencia de manchones de arbolado joven originado por los claros ocasionados por el derribo excesivo de árboles adultos (Figura 4). Estos resultados coinciden con Solís *et al.* (2006) quienes registraron un valor de $W_i = 0.57$ para dos parcelas con aclareos y con tratamiento de selección. Diversos estudios señalan que la distribución aleatoria generalmente se da en áreas con intervenciones silvícolas (Aguirre *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005). Por otro lado, Rubio *et al.* (2017), registraron un valor promedio de $W_i = 0.49$ en un área post-incendio de un bosque de pino-encino en Nuevo León, México.

Tabla 2. Media y desviación estándar de cada uno de los índices por sitio.

ÍNDICE	S1		S2	
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
Winkelmass (W_i)	0.52	0.20	0.54	0.22
Índice de mezcla (M_i)	0.81	0.24	0.57	0.39
Estructura dimensional (TD)	0.33	0.20	0.36	0.13
Estructura dimensional (TH)	0.34	0.18	0.32	0.14
Índice de dominancia (UDi)	0.47	0.38	0.52	0.36
Índice de dominancia (UHi)	0.46	0.40	0.48	0.37

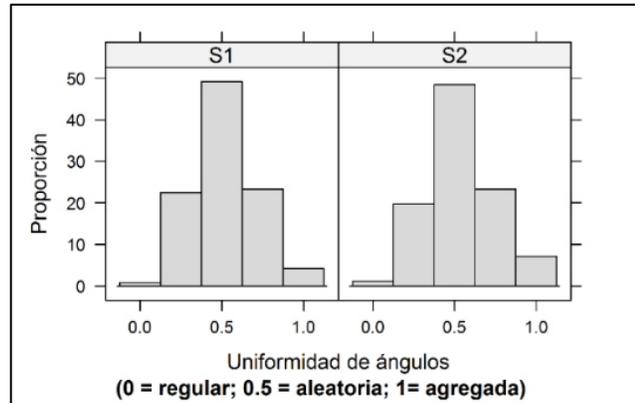


Figura 4. Distribución de frecuencias del índice de uniformidad de ángulos de Gadow (W_i) para los dos sitios.

Índice de mezcla de especies (M_i).

Los valores obtenidos en este índice fueron de $M_i = 0.81 \pm 0.24$ y $M_i = 0.57 \pm 0.39$ para S1 y S2 respectivamente (Tabla 2). En el S1 la mayor proporción se encuentra en la categoría 1, lo que indica que la mayoría (> 50%) de los individuos muestreados están rodeados por individuos de especies diferentes. Para el caso del S2 la mayor frecuencia también se presenta en la categoría 1, pero en menor proporción los árboles (35%) están rodeados por individuos de especies diferentes (Figura 5).

De acuerdo con estos resultados se puede decir que existe un mayor grado de mezcla en el S1. Generalmente los tratamientos silvícolas favorecen a las especies comerciales importantes lo que hace que la mezcla de especies sea menor en algunos sitios. Se han reportado valores de valores de $M_i = 0.30$ y $M_i = 0.44$ para parcelas con aclareos y con tratamiento de selección respectivamente, por lo que este valor varía de acuerdo con el tratamiento aplicado (Solís *et al.*,

2006). En áreas naturales protegidas se han registrado valores superiores a $M_i = 0.61$ (Corral-Rivas *et al.*, 2013).

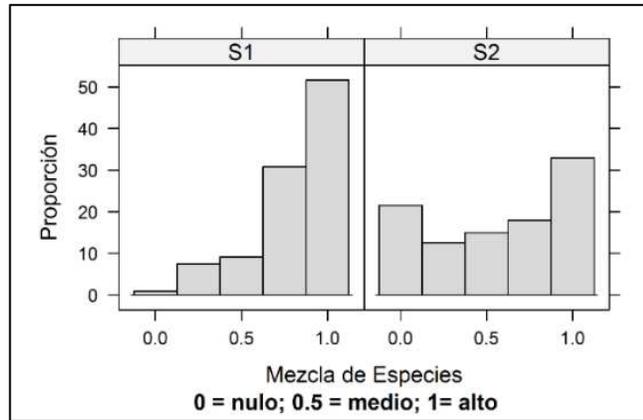


Figura 5. Distribución de la frecuencia porcentual de los valores del índice de mezcla de especies de Gadow (M_i) en los sitios evaluados.

Diferenciación diamétrica (TD_i).

Los valores promedios para este índice para el S1 y el S2 fueron de $TD_i = 0.33 \pm 0.20$ y $TD_i = 0.36 \pm 0.13$ respectivamente, lo que indica una diferenciación moderada para ambos sitios (Tabla 2). Sin embargo, en las distribuciones de las frecuencias por sitio se puede observar que en el S1 la categoría más representada es la categoría moderada (40 %), seguida de la débil (30 %), es decir que el 30 % de los individuos presentan la misma dimensión en diámetro. Para el S2 la categoría más representada es la moderada (50 %) pero seguida de la clara (35 %) y solo el 10 % presentan la misma dimensión, por lo cual la mayor diferenciación la presenta el sitio 2 (Figura 6). Cuando se presentan una diferenciación dimensional escasa, se debe a que los sitios fueron desprovistos de su vegetación original y los individuos tuvieron condiciones ambientales similares para su desarrollo, presentando así una alta similitud en diámetros y posiblemente en edad (Jiménez *et al.*, 2009). Corral *et al.* (2013) reportó valores cercanos al $TD_i = 0.75$, observándose una tendencia de presencia de estructuras más complejas en las áreas naturales protegidas.

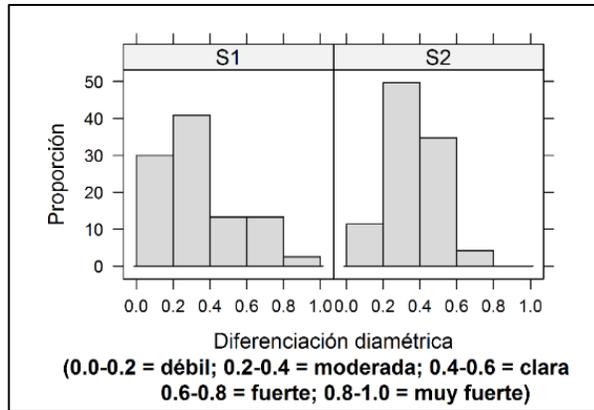


Figura 6. Grado de diferenciación diamétrica (TD_i) por sitio.

Diferenciación de alturas (TH_i).

Los valores registrados fueron muy similares a los de TD_i , pues fueron de $TH_i = 0.34 \pm 0.18$ y $TH_i = 0.32 \pm 0.14$ para los S1 y S2 respectivamente (Tabla 2). Se puede observar que en el S1 la categoría más representada es la moderada, seguida de la categoría débil, para el caso del S2 la categoría moderada es la más representada seguida de la categoría clara, lo cual indica que existe una mayor diferenciación en el S2 (Figura 7). Según Cano (1988), la altura es una variable que es menos afectada por los tratamientos silviculturales a comparación del diámetro.

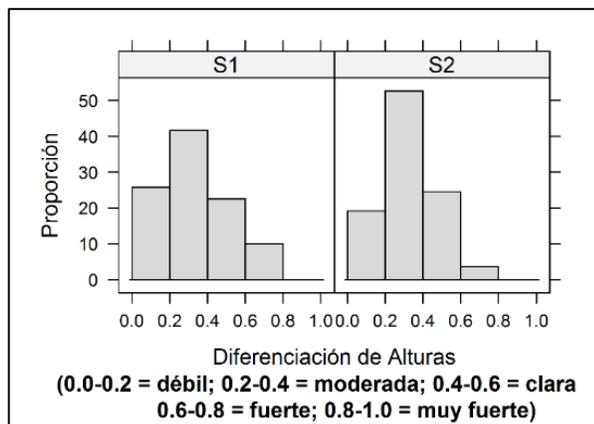


Figura 7. Grado de diferenciación diamétrica (TH_i) por sitio.

Índice de dominancia dimensional diamétrica (UD_i).

Los valores para este índice fueron $UD_i = 0.47 \pm 0.38$ para S1 y $UD_i = 0.52 \pm 0.36$ para S2 (Tabla 2). En los dos sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa, es decir, los dos sitios presentan heterogeneidad de dimensiones diamétricas. Valores cercanos a 0.50 corresponden a la clasificación codominante (Kraft, 1884) por lo que dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia. En el S1 se presenta un mayor número de individuos en las clases suprimido y muy dominante, mientras que en el S2 el mayor número de individuos se presenta en las clases codominante y muy dominante (Figura 8). Esto se debe al tipo tratamiento aplicado en cada sitio, tal es el caso del S1, donde se eliminó casi el total de los individuos y solo se dejaron los árboles considerados como mejores y que aquí se presentan como muy dominantes (dominancia alta) y la regeneración establecida se presenta como suprimidos (dominancia nula), la cual es caracterizada por un denso sotobosque provocado por los espacios generados y la penetración de luz. Se han registrado valores similares en bosques evaluados después de un incendio (Rubio-Camacho *et al.*, 2017) y en áreas de matorral espinoso tamaulipeco con diferentes tipos de perturbación (Jiménez-Pérez *et al.*, 2009).

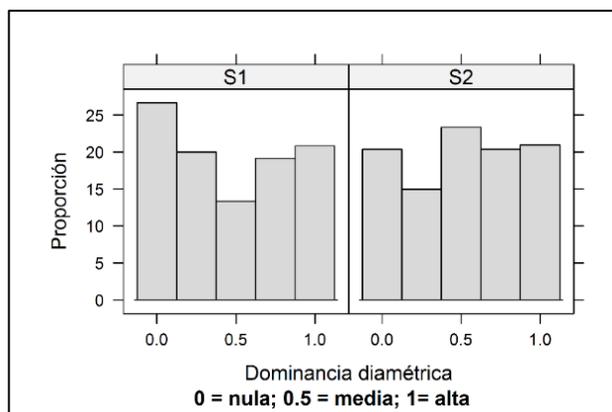


Figura 8. Grado de dominancia en diámetros (UD_i) por sitio.

Índice de dominancia dimensional de altura (UH_i).

Los valores indican una gran similitud en ambos sitios ya que se registró un valor de $UH_i = 0.46 \pm 0.40$ para S1 y $UH_i = 0.48 \pm 0.37$ para S2. Por lo que al igual que en UDi en los dos sitios existen todas las clases sociales representadas. En ambos sitios se presenta un mayor número de individuos en las clases suprimido. El S1 presenta mayor proporción en la categoría dominante que el S2, esto refleja el efecto del tratamiento aplicado donde claramente se diferencian dos estratos; el de los árboles dominantes y el de los suprimidos (regeneración) (Figura 9). Valores similares han sido registrados en áreas bajo manejo forestal en la Sierra Madre Occidental, donde los bosques presentan diferenciación de dimensiones heterogénea (Solís *et al.*, 2006).

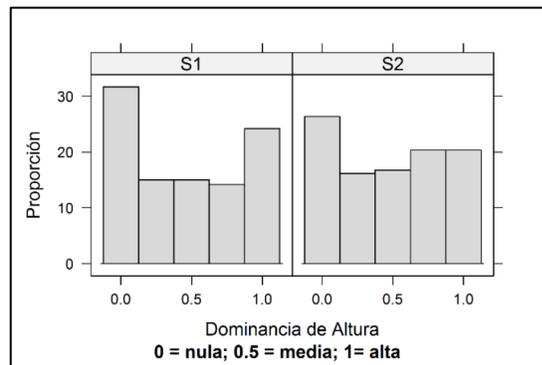


Figura 9. Grado de dominancia en alturas (UH_i) por sitio.

CAPÍTULO IV
COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE CINCO
ASOCIACIONES DIFERENTES DE BOSQUES DE *Pinus*
durangensis

COMPOSITION AND SPATIAL STRUCTURE OF FIVE
DIFFERENT ASSOCIATIONS OF FORESTS OF *Pinus*
durangensis



Fotografía de un bosque de *Pinus* en asociación con otras especies.

Manuscrito sometido a la revista *Madera y Bosques* el 19 de febrero de 2019.

CAPÍTULO IV

COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE CINCO ASOCIACIONES DIFERENTES DE BOSQUES DE *Pinus durangensis*

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue estudiar las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *Pinus durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla. Los datos provienen de cinco sitios cuadrangulares de 2500 m², establecidos cada uno en diferente bosque de *P. durangensis* en la Sierra Madre Occidental. Para cada sitio se determinó la altura promedio, diámetro promedio y la cobertura de copa, así como los índices de mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia. Los índices se combinaron dos a dos para obtener tres distribuciones bivariantes. El bosque puro de *P. durangensis* presentó los individuos con mayor altura, mientras que el mayor diámetro fue para la asociación con *P. teocote*. El índice de mezcla (M_i) indica que solo en el bosque puro existe una baja mezcla de especies. El índice de uniformidad de ángulos (W_i) muestra que los árboles de manera general tienen una distribución aleatoria. Los valores de dominancia (U_i) muestran que en todos los sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa. Los índices y sus combinaciones describen adecuadamente la distribución espacial de los árboles y su relación con sus vecinos más cercanos. La información obtenida de la combinación de las variables estructurales ayuda a mejorar la comprensión de la estructura espacial del bosque, y además de contribuir a la regulación de la intensidad de corta y garantizar una gestión sostenible.

Palabras clave: cinco árboles, distribución bivariada, dominancia, mezcla, uniformidad.

Abstract

The objective of the present investigation was to study the bivariate structural characteristics of five different associations of *Pinus durangensis* forests, identifying the similarities and differences in the bivariate distribution of uniformity of angles, dominance and mixing. The data comes from five quadrangular sites of 2500 m², each established in different forest of *P. durangensis* of the Sierra Madre Occidental. For each site the average height, average diameter and crown coverage were determined, as well as the species mix index, angle uniformity and dominance indexes. The indices were combined two to two to obtain three bivariate distributions. The pure forest of *P. durangensis* presented individuals with higher height, while the largest diameter was for the association with *P. teocote*. The mix index (*Mi*) indicates that only in the pure forest there is a low mix of species. The angle uniformity index (*Wi*) shows that trees generally have a random distribution. The values of dominance (*Ui*) show that in all the sites there are all the social classes represented in an equitable way. The indexes and their combinations adequately describe the spatial distribution of the trees and their relationship with their closest neighbors. The information obtained from the combination of the structural variables helps to improve the understanding of the spatial structure of the forest, and in addition to contributing to the regulation of cutting intensity and ensuring sustainable management.

Keywords: five trees, bivariate distribution, dominance, mixture, uniformity.

Introducción

Pinus durangensis Martínez es una de las especies del género *Pinus* más importantes en México por su área de distribución (143 000 km²), calidad de madera, valor comercial y por ser componente clave para la conservación de la biodiversidad de la Sierra Madre Occidental (SMO) (Monárrez-González y Ramírez-Maldonado, 2003; Gómez-Mendoza y Arriaga, 2008). Esta especie generalmente se encuentra en partes altas (por encima de 2000 msnm) de la vertiente occidental de la SMO formando masas puras sobre laderas con escasa pendiente y clima relativamente húmedo. Entre los elementos que se asocian con esta especie están *Pinus cooperi*, *P. teocote*, *P. leiophylla* y *Quercus sideroxyla* (González-Elizondo *et al.*, 2012).

El aprovechamiento forestal que se ha realizado en las últimas décadas ha modificado la estructura de los bosques, por lo que su conocimiento, aunado a la dinámica de rodales, es fundamental para garantizar la sostenibilidad de estos sistemas (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). La información sobre la estructura del bosque contribuye a una mejor comprensión de la historia y la función del bosque y del potencial de desarrollo futuro de un ecosistema forestal (Franklin *et al.*, 2002).

Hui y Pommerening (2014) mencionan que la composición y estructura son un indicador de la biodiversidad que existe dentro de los bosques. Por su parte, Del Rio *et al.* (2013) señalan que los árboles son el elemento más relevante, pues las distintas especies presentan diferentes características morfológicas y dan lugar a diferentes estructuras.

De acuerdo con Gadow (1993) y Hui *et al.* (1998, 1999, 2003), la estructura espacial de un bosque se puede representar utilizando índices basados en vecindarios (índice de ángulo uniforme, mezcla y dominancia) que representan la variación a pequeña escala de las especies arbóreas, el diámetro del árbol y los patrones de distribución en una pequeña unidad estructural. Estos índices

han demostrado ser útiles para analizar la estructura espacial de los bosques mixtos (Hui *et al.*, 1998; Graz, 2006; Pommerening 2006).

Dos de los índices estructurales se pueden combinar para obtener una distribución bivariada, que, dependiendo del índice, proporcionará información estructural sintetizada sobre la mezcla entre especies arbóreas, los patrones de distribución o la competencia entre individuos. Con esta información se pueden analizar los cambios en la estructura espacial del bosque antes y después de las intervenciones silvícolas, lo que puede ayudar a regular la intensidad de corta y garantizar un manejo sostenible (Li, 2013).

En la SMO se han realizado diferentes estudios que evalúan la composición y estructura de los ecosistemas forestales, pero son pocos para la superficie que ocupa esta cadena montañosa (Solís *et al.*, 2006; Aguirre *et al.*, 2003; Aragón-Piña *et al.*, 2010; Navar-Chaidez *et al.*, 2009; Wehenkel *et al.*, 2015). Además, se ha evaluado escasamente la distribución espacial, limitándose sólo a distribución espacial univariada, por lo que son nulas las investigaciones que aborden la distribución espacial bivariada en esta región. La presente investigación pretende estudiar las características estructurales bivariadas de cinco asociaciones diferentes de bosques de *P. durangensis*, identificando las similitudes y diferencias en la distribución bivariada de uniformidad de ángulos, dominancia y mezcla, y de esta forma proporcionar una guía útil para el manejo forestal basada en la estructura en los bosques de *P. durangensis*.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en la región de El Salto, Durango, México, ubicada en la parte suroeste del estado, en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental. Está enmarcada geográficamente entre los paralelos 23° 42' 34.48" y 23° 49' 28.18" de latitud Norte y los meridianos 105° 30' 11.83" y 105° 40' 6.56" de longitud Oeste (Figura 1).

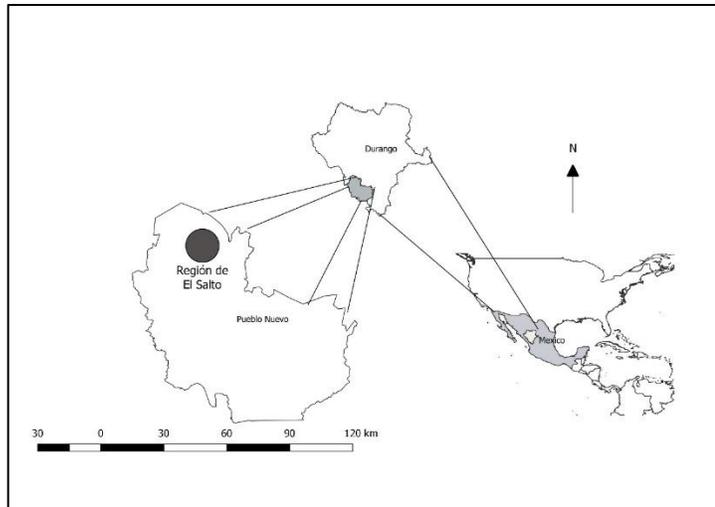


Figura 1. Región de El Salto, Durango.

En el área de estudio, la altura sobre el nivel del mar varía entre 2500 y 2900 msnm. Los tipos de suelo presentes en área son litosol, cambisol y regosol con textura predominantemente gruesa a media. El tipo de roca predominante es ígnea extrusiva ácida (INEGI, 2010). En esta zona prevalecen climas de tipo (A)C(W2), C(W2), C(E)(M) y C(E)(W2), la precipitación promedio media anual es de 1200 mm y la temperatura es de 18 °C (INEGI, 2009). Los tipos de vegetación predominantes corresponden a formaciones naturales de bosques de pino y pino-encino.

Los datos provienen de cinco sitios en diferentes bosques de *Pinus durangensis* que fueron áreas de aprovechamiento forestal, los cuales fueron establecidos siguiendo la metodología desarrolladas por Corral-Rivas *et al.* (2009). Los sitios son cuadrangulares de 2 500 m² (50 m X 50 m) y fueron establecidos en el 2007 (Tabla 1, Figura 2).

A todos los individuos registrados en los sitios se les midió el diámetro normal ($d_{1.30}$) ≥ 7.5 cm, altura total (h), se identificó la especie a la que pertenecía, se registró la distancia en metros y azimut en grados desde el centro del sitio.

Tabla 1. Características básicas de los cinco sitios.

Sitio	Bosque	Altitud	Latitud Norte	Longitud Oeste	Exposición	Pendiente	Fisiografía
a)	<i>P. durangensis</i> (puro)	2613	23°44' 39.72"	105°40' 11.13"	O	31 %	Lomerío
b)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. teocote</i>	2865	23°41' 23.27"	105° 24' 13.61"	NE	12 %	Ladera
c)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. cooperi</i>	2687	23°43' 02.63"	105°36' 37.79"	SE	15 %	Ladera
d)	<i>P. durangensis</i> - <i>P. strobiformis</i>	2699	23°47' 27.96"	105° 25' 51.16"	Z	2 %	Valle
e)	<i>P. durangensis</i> - <i>Q. sideroxylla</i>	2605	23°50' 42.78"	105° 25' 53.01"	N	31 %	Ladera

O = Oeste; NE = Noreste; SE = Sureste; Z = Zenital (plano); N = Norte.

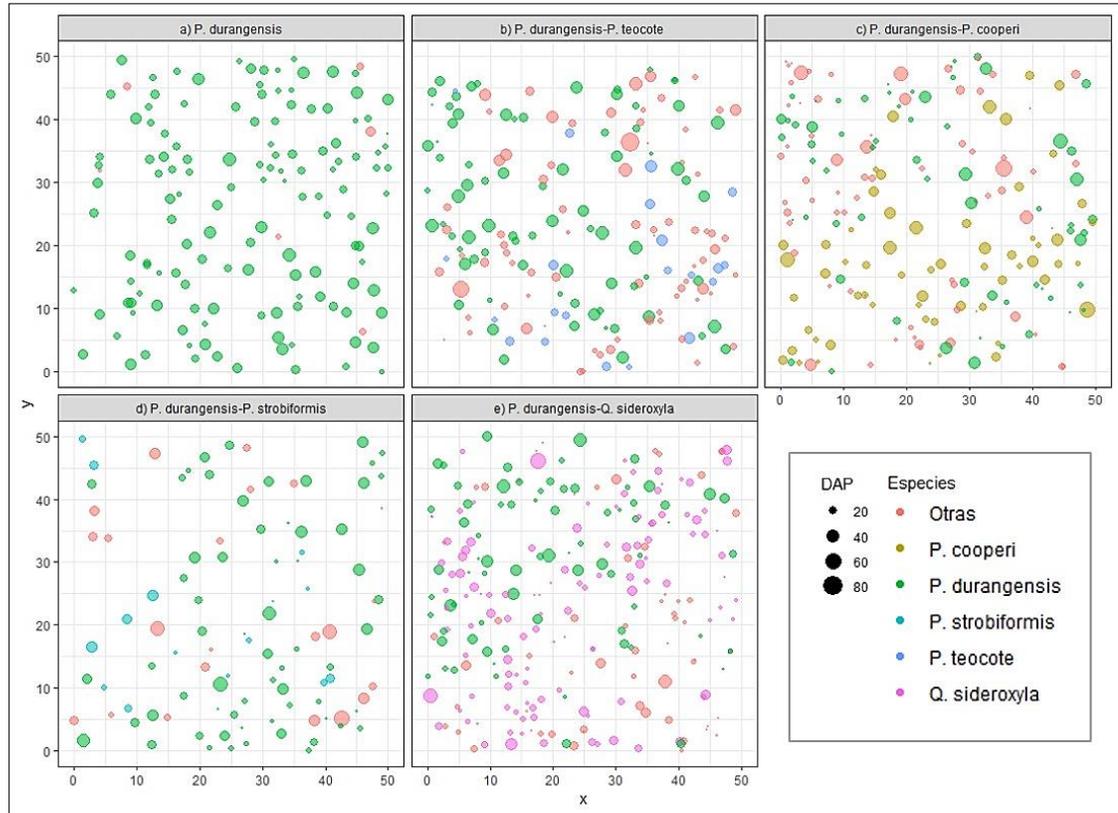


Figura 2. Representación de la distribución espacial del arbolado por sitio en el área de estudio. Los círculos representan los árboles, cuyo tamaño está escalado al diámetro normal ($d_{1.30}$) ≥ 7.5 cm.

Análisis de los datos

Para cada sitio se determinó la altura promedio, diámetro promedio y la cobertura de copa, así como los índices de mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia. Para la estimación de los parámetros estructurales se utilizó el muestreo denominado “grupo estructural de los cinco árboles” el cual toma un árbol de referencia (i) y sus 4 vecinos más cercanos (Gadow, 1993; Fuldner, 1995; Gadow *et al.*, 2001; Aguirre *et al.*, 2003; Pommerening, 2006).

Índice de mezcla de especies (M_i)

El grado de mezcla entre especies es una medida de la diversidad en la distribución espacial, el cual se puede estimar mediante el índice de mezcla M_i de Fuldner (1995). Éste se define como la proporción de n vecinos más cercanos que no pertenecen a la misma especie del árbol de referencia (i), en todos los casos se toman los cuatro vecinos más cercanos.

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (1 - v_{ij})$$

donde $0 \leq M_i \leq 1$, v_j es igual a 0 cuando el árbol j es de la misma especie que el árbol de referencia i y será 1 en caso contrario (Gadow *et al.*, 2007) (Figura 3a).

Índice de uniformidad de ángulos (W_i)

Este índice describe la regularidad o la irregularidad de la distribución del arbolado (Aguirre, 2004; Gadow *et al.*, 2007; Pommerening, 2002). Se basa en la medición de los ángulos entre los vecinos a un árbol de referencia i y su comparación con un ángulo estándar α , de tal manera que al considerar cuatro vecinos al árbol de referencia W_i puede tomar valores de 0 hasta 1, donde un valor cercano a cero representa condiciones de regularidad, valores cercanos a 0.50 muestran tendencia a la aleatoriedad y los próximos a 1 presentan condiciones de agrupamiento. En este estudio se consideró un valor de referencia al ángulo estándar α , que se esperaría en una distribución regular = 72° comparado con cada α_j (Gadow *et al.*, 1998; Ledo *et al.*, 2012). El índice de ángulos se calcula con la siguiente ecuación (Gadow *et al.*, 1998):

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_{ij}$$

donde: W_i = valor del índice para el i -ésimo árbol referencia, n = es el número de árboles vecinos considerados, V_{ij} = variable 1 cuando el j -ésimo ángulo α entre

dos árboles vecinos próximos es menor o igual al ángulo estándar α , en caso contrario toma un valor de 0 (Figura 3b).

Índice de dominancia (U_i)

Este índice también es conocido como medida de entorno y describe la dominancia relativa de una especie en su entorno directo. Se define como la dominancia del árbol referencia i con respecto a sus 4 vecinos más cercanos, es decir, el número de árboles n más pequeños (en diámetro o altura) que el árbol de referencia.

$$U_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n v_j$$

donde $0 \leq U_i \leq 1$ y v_j será igual a 1 si el árbol j es menor al árbol referencia i , y 0 en caso contrario (Figura 3c).

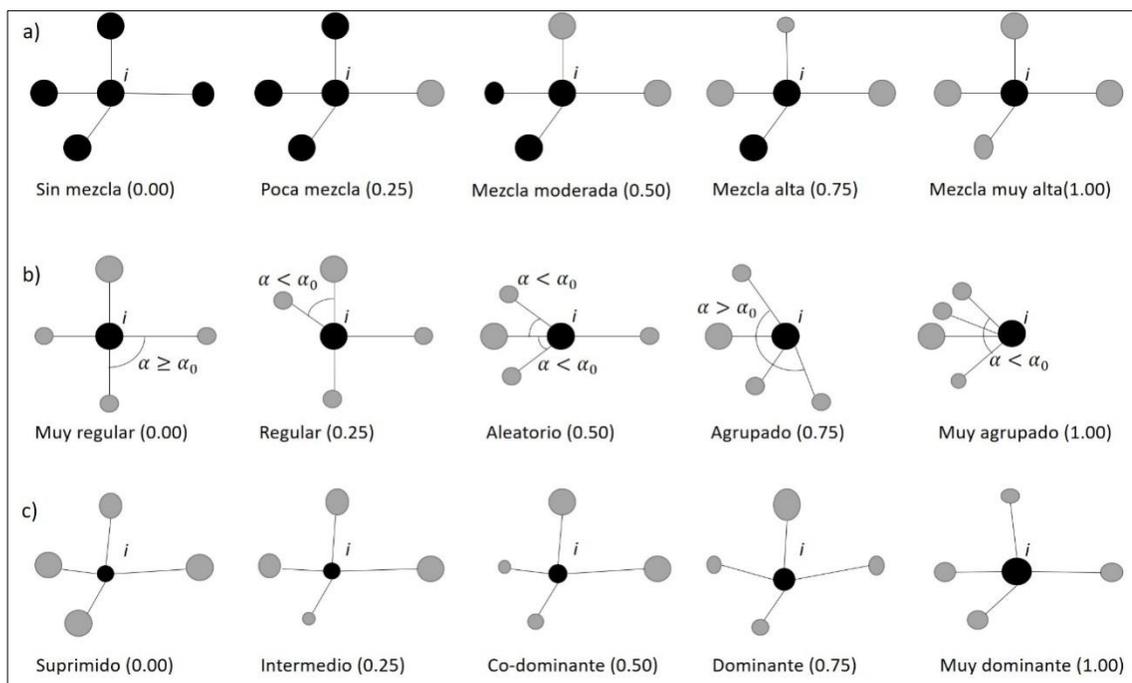


Figura 3. Representación esquemática de los índices estructurales de mezcla (a) uniformidad de ángulos (b) y dominancia (c).

Cuando el índice de ángulo uniforme, mezcla y dominancia no se combinan, sólo pueden proporcionar una característica de la estructura del bosque. Estos tres parámetros son inherentemente independientes y tienen los mismos cinco valores y frecuencias (0.00, 0.25, 0.50, 0.75, y 1.00). Pero también se pueden combinar dos a dos para obtener tres distribuciones bivariantes y así representar las características estructurales espaciales de los bosques (Li, 2013).

Para evitar el efecto de borde se utilizó el estimador NN1, el cual consiste en omitir como árbol de referencia (i) a aquéllos cuya distancia a su j -ésimo vecino más cercano sea menor a la distancia entre éste y el borde del sitio. No obstante, esto no los elimina para formar parte de otros índices.

Para el cálculo de los diversos índices se usó el programa CRANCOD v 1.4 (Pommerening, 2012), así como adaptaciones de algunos scripts para el programa R (R Development Core Team, 2011).

Resultados

Los cinco sitios estudiados presentan diferente cantidad de árboles y composición de especies, el sitio “a” es más puro, ya que presentó 140 árboles en total, de los cuales 134 (96 %) corresponden a la especie *P. durangensis*, la proporción de esta especie disminuye en los siguientes sitios. El “b” contiene 175 individuos en total de los cuales 77 (44 %) son de *P. durangensis* y 22 (13 %) de *P. teocote*. El “c” contienen 191 árboles, 63 (33 %) son de *P. durangensis* y 60 (31 %) de *P. cooperi*. En el “d” se registraron 100 árboles con proporciones de *P. durangensis* de 62 (62 %) y 16 de *P. strobiformis*. Por otro lado, en el “e” se registraron 249 individuos, aquí *Q. sideroxylla* tuvo una presencia de 115 árboles (46 %) mayor en comparación con *P. durangensis* que reportó 74. En todos los sitios se presentaron otras especies, las cuales de forma unitaria fueron de menor proporción (Figura 4).

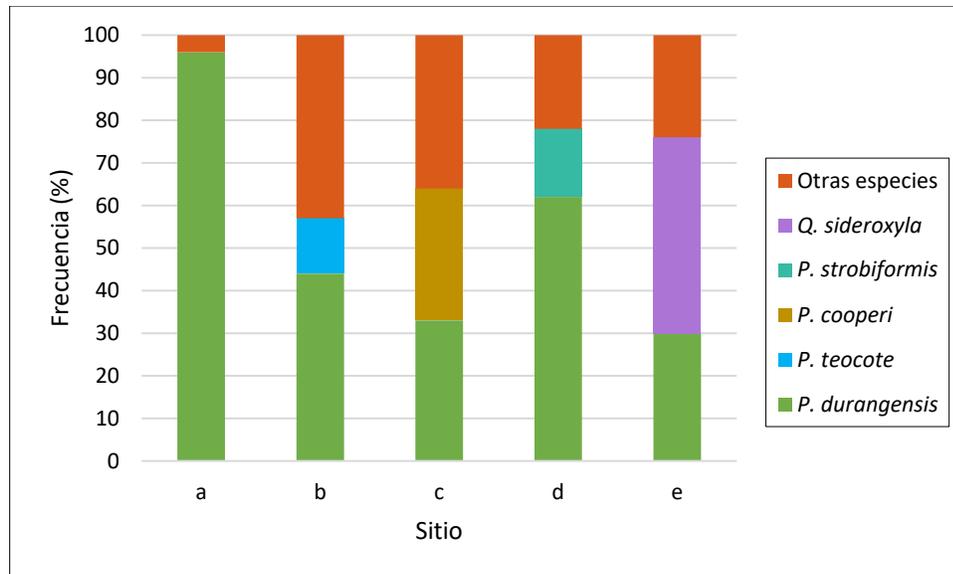


Figura 4. Frecuencia de especies por sitio.

El sitio de bosque puro de *P. durangensis* presentó la mayor altura promedio (18 ± 3 m) en comparación con las asociaciones con otras especies (Tabla 2). Así, en el bosque mixto de *P. durangensis*-*Q. sideroxylla* se presentó el valor promedio de altura más bajo de todas las asociaciones (12 ± 5 m). En relación con el diámetro promedio, el sitio de *P. durangensis*-*P. teocote* presentó el mayor valor, mientras que el sitio de *P. durangensis*-*Q. sideroxylla* ofreció el valor de DAP más bajo de todas las asociaciones. Sin embargo, esta asociación de *P. durangensis*-*Q. sideroxylla* fue la que mostró valores más altos de cobertura (superiores al 100% y, por tanto, con solapamiento de copas). En el lado opuesto, el sitio de *P. durangensis*-*P. strobiformis* ofreció la cobertura más baja, que no llegó al 75% (Tabla 2).

Tabla 2. Altura, diámetro promedio (\pm desviación estándar) y cobertura total de las cinco asociaciones de *P. durangensis*.

Asociación	Altura $\pm \sigma$ (m)	DAP $\pm \sigma$ (cm)	Cobertura (%)
<i>P. durangensis</i>	18 ± 3	22 ± 8	82
<i>P. durangensis</i> - <i>P. teocote</i>	13 ± 5	23 ± 11	97
<i>P. durangensis</i> - <i>P. cooperi</i>	15 ± 7	20 ± 11	97
<i>P. durangensis</i> - <i>P. strobiformis</i>	14 ± 5	21 ± 10	74
<i>P. durangensis</i> - <i>Q. sideroxylla</i>	12 ± 5	17 ± 8	>100

Índices estructurales

Los resultados del índice de mezcla (Mi) indican que existe una baja mezcla de especies en el sitio de bosque puro de *P. durangensis*, mientras que en el resto de los sitios la mezcla aumenta considerablemente al asociarse con diferentes especies (Tabla 3) a excepción de asociación *P. durangensis*-*P. strobiformis* que mantiene un bajo grado de mezcla. El índice de uniformidad de ángulos (Wi) muestra que los árboles de manera general en todos los sitios tienen una distribución aleatoria, pues los valores obtenidos se encuentran alrededor de 0.50. Para la dominancia (Ui) los valores indican que en los cinco sitios existen todas las clases sociales representadas de manera equitativa, es decir, presentan heterogeneidad de dimensiones diamétricas. Valores cercanos a 0.50 corresponden a la clasificación codominante (Kraft, 1884) indicando que dos de los vecinos son más grandes que el árbol de referencia.

Tabla 3. Media y desviación estándar (σ) de los índices estructurales por sitio (mezcla de especies, uniformidad de ángulos y dominancia).

Asociación	Índice		
	Uniformidad (Wi)	Mezcla (Mi)	Dominancia (Ui)
<i>P. durangensis</i>	0.52 ± 0.21	0.09 ± 0.22	0.51 ± 0.35
<i>P. durangensis</i> - <i>P. teocote</i>	0.51 ± 0.19	0.66 ± 0.30	0.52 ± 0.36
<i>P. durangensis</i> - <i>P. cooperi</i>	0.49 ± 0.19	0.63 ± 0.31	0.51 ± 0.36
<i>P. durangensis</i> - <i>P. strobiformis</i>	0.50 ± 0.19	0.53 ± 0.35	0.50 ± 0.37
<i>P. durangensis</i> - <i>Q. sideroxyla</i>	0.48 ± 0.18	0.59 ± 0.30	0.50 ± 0.36

Distribución bivariada de los índices de uniformidad de ángulos (Wi) y mezcla (Mi)

En los cinco sitios los valores máximos de frecuencia Wi - Mi en todas las especies se ubicaron en $Wi = 0.50$ y disminuyeron hacia ambos lados, sin embargo, el sitio "a" presentó la mayor frecuencia (35 %). Esto indica que la mayoría de los árboles se encuentran distribuidos de forma aleatoria con una regularidad y agrupamiento mínimo o nulo. Por otro lado, el grado de mezcla se comportó de forma diferente, siendo el sitio "a" el que presentó menor mezcla ($Mi = 0$) ya que se trata de un bosque más puro. En el resto de los sitios el grado de mezcla aumentó gradualmente sobre el eje $Wi = 0.50$. Esto indica que el primer sitio está

compuesto por árboles con un bajo nivel de mezcla y alto grado de segregación de especies con una distribución aleatoria. Los bosques mixtos pertenecen a áreas más heterogéneas con menor grado de segregación y con distribución aleatoria.

Por otro lado los árboles de la especie *P. durangensis* presentan una distribución similar a la anterior, pues se distribuyen en su mayoría de forma aleatoria con un grado de mezcla menor sólo en el sitio “a” ($W_i = 0.5$ y $M_i = 0$) que presenta la mayor frecuencia de distribución aleatoria y sin mezcla (35 %), en los otros sitios esta frecuencia disminuye, siendo mayor en distribución aleatoria y mezcla moderada ($W_i = 0.5$ y $M_i = 0.5$). Para el caso de las asociaciones, en el sitio “b” se observa que una frecuencia elevada de árboles de *P. teocote* (27 %) que tienden al agrupamiento con una mezcla muy alta ($W_i = 0.75$ y $M_i = 1$). Para el caso de los demás sitios las especies asociadas se presentan distribuidas de forma aleatoria y con un grado de mezcla alto ($W_i = 0.5$ y $M_i = 0.75$) (Figura 5).

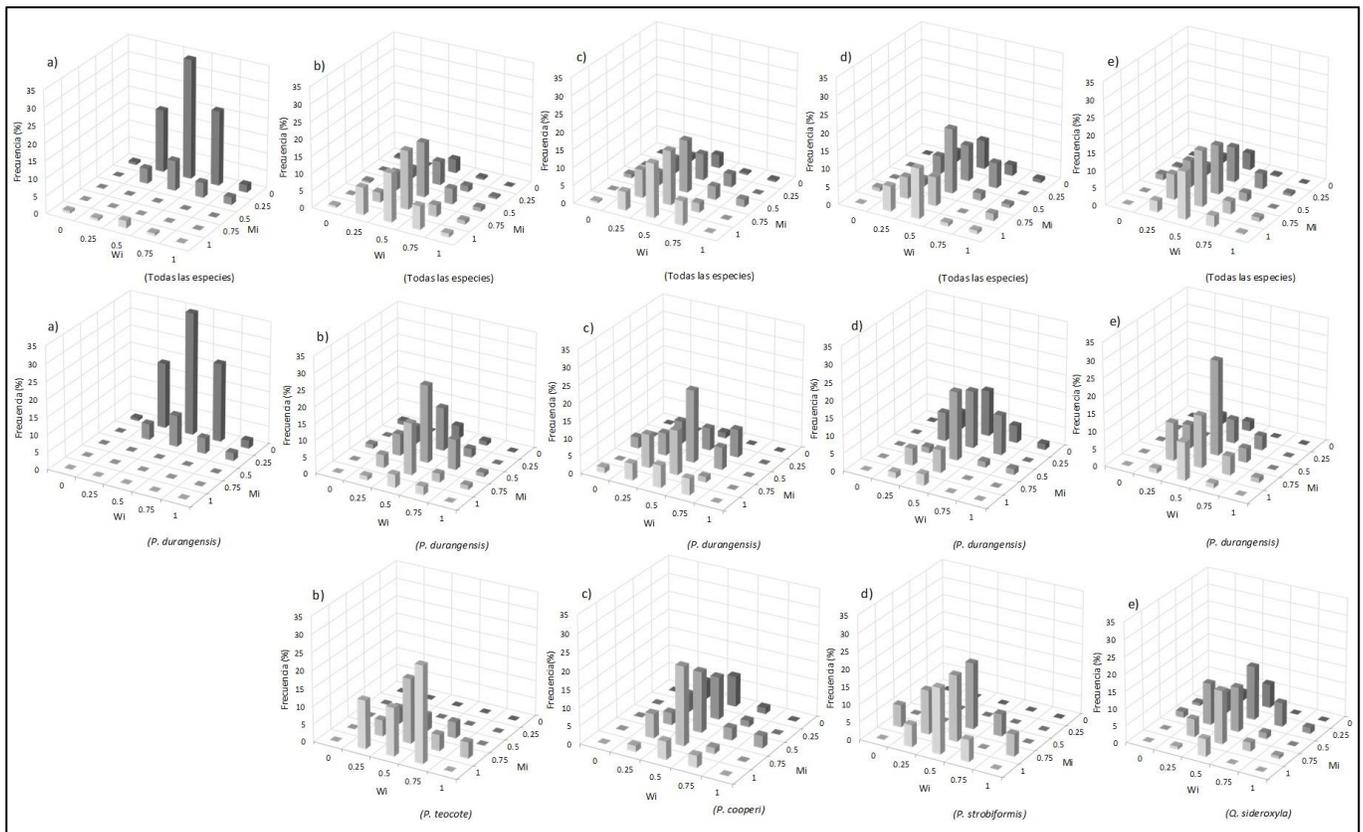


Figura 5. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y mezcla.

Distribución bivariada de los índices de uniformidad de ángulos (W_i) y dominancia (U_i)

Los valores máximos de frecuencia W_i-U_i para todas especies en los cinco sitios convergieron en el mismo eje ($W_i=0.50$), presentando una distribución aleatoria y disminuyendo gradualmente en ambos lados hasta ubicarse en $W_i = 0$ y $W_i = 1$ independientemente del tipo de bosque presente. Por otro lado, en el eje de dominancia (U_i) los valores fueron muy similares en todas las categorías de todos los sitios, es decir existen todas las clases presentes de forma equitativa desde árboles suprimidos hasta muy dominantes. Sin embargo, en el sitio “b” existe mayor frecuencia de individuos que son dominantes (13 %), mientras que en el “c” existe mayor frecuencia de suprimidos (14 %), en el d co-dominantes (18 %) en el “d” son dominantes (15 %). Es decir, los árboles presentan una distribución aleatoria sin importar el estatus dominante.

Los individuos de *P. durangensis* presentan una distribución aleatoria ($W_i = 0.50$) pero existe una heterogeneidad de dimensiones con valores de frecuencias similares de U_i . Los valores máximos de frecuencia (≥ 16 %) se ubicaron en $U_i = 1$ en todos los sitios salvo en el sitio “c” ($U_i = 0.5$), lo que indica que *P. durangensis* en los sitios “a”, “b”, “d” y “e” es muy dominante sobre las demás especies asociadas. *P. cooperi* y *P. strobiformis* son codominantes (19 %), mientras que *P. teocote* y *Q. sideroxylla* suelen ser intermedios (18 y 17 %) (Figura 6).

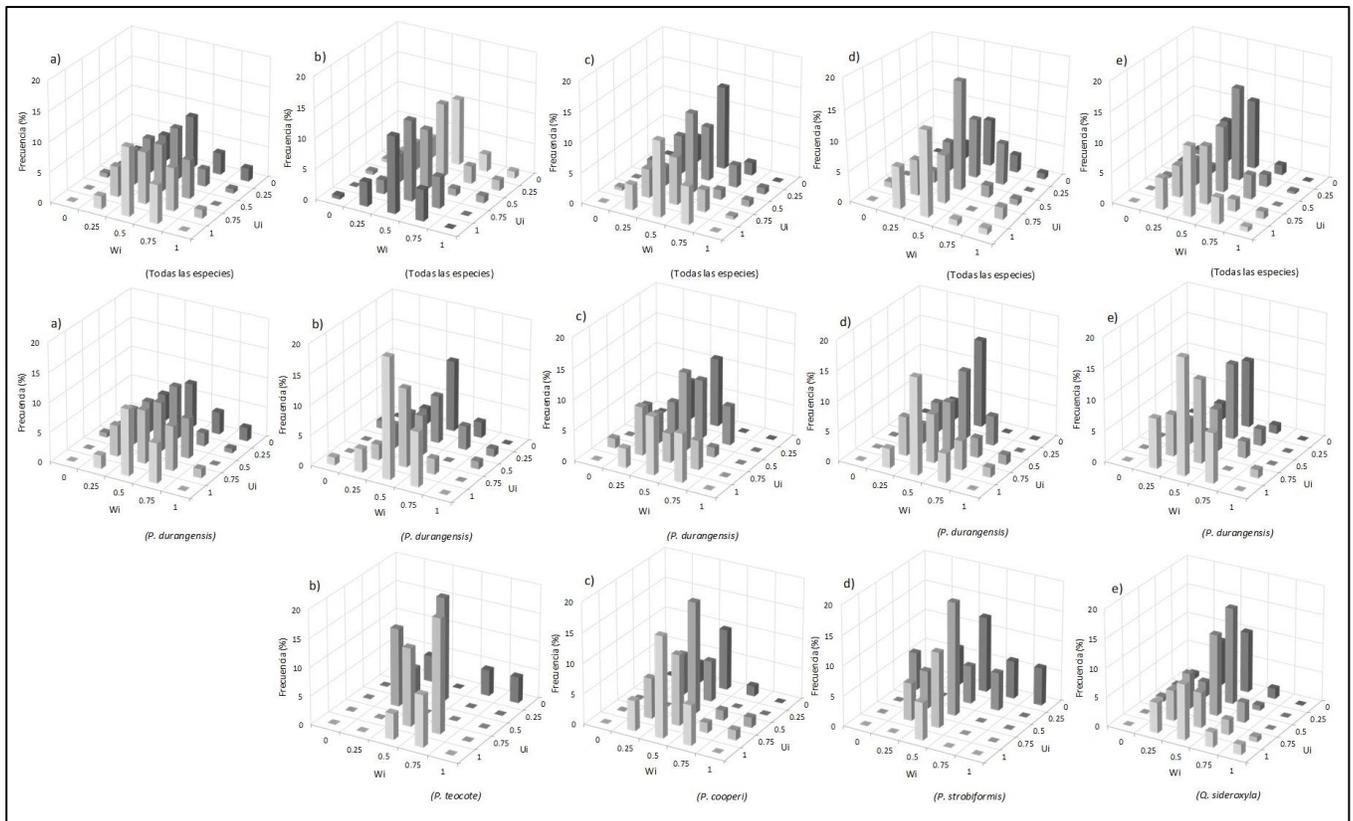


Figura 6. Distribución bivariada de uniformidad de ángulos y dominancia.

Distribución bivariada de los índices de mezcla (Mi) y dominancia (Ui)

La distribución bivariada Mi - Ui de todas las especies se comportó de forma diferente en todos los sitios (Figura 7). Para el caso del sitio “a” la mayor frecuencia se ubicó en la combinación $Ui = 0.75$ y $Mi = 0$, indicando que hay más individuos que son dominantes y que están rodeados de árboles que son de la misma especie (19 %), por lo que la mezcla de especies es muy baja o nula. El sitio con mayor frecuencia de árboles dominantes y con mayor mezcla, es el sitio “c” ($Ui=1$ y $Mi=0$) con (7 %). Sólo en “d” y “e” existe mayor frecuencia de árboles suprimidos rodeados de árboles de diferentes especies (9 y 7 %) por lo que se encuentran totalmente mezclados ($Ui= 0$ y $Mi=1$).

P. durangensis suele estar presente en todas las clases desde árboles suprimidos hasta los muy dominantes, como en el sitio “a” donde se presentan valores de frecuencia muy similar en todas las categorías y una mezcla casi nula. Llama la atención el sitio “b” donde la mayor proporción de los árboles (14 %)

tienden a la dominancia y mezcla moderada ($U_i=1$ y $M_i=0.50$). Por el contrario, en el sitio “c” la mayor frecuencia (11 %) es de árboles suprimidos y mezcla moderada ($U_i=0$ y $M_i=0.50$). Otro caso particular fue el del sitio “e” donde la mayor frecuencia de árboles (14 %) dominantes y un grado de mezcla alta ($U_i=1$ y $M_i=0.75$).

P. durangensis resulta ser la especie dominante en casi todos los sitios, presentado una mezcla media cuando se encuentra asociada con *P. teocote*. Sin embargo, cuando se asocia con *P. cooperi*, y, en menor medida, *P. strobiformis*, la dominancia de *P. durangensis* disminuye notablemente y la mezcla aumenta considerablemente (Figura 7).

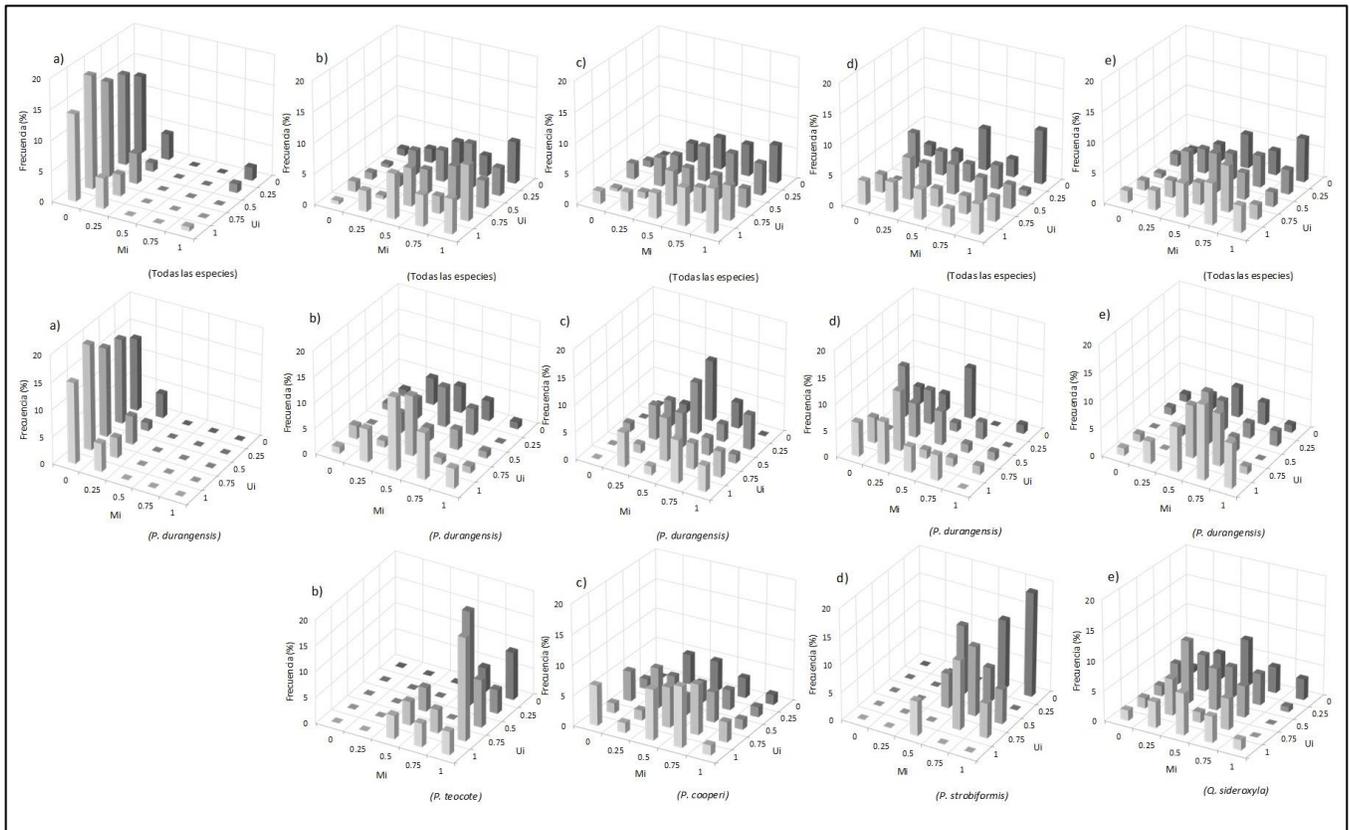


Figura 7. Distribución bivariada de mezcla y dominancia.

Discusión

En el análisis de los cinco tipos de bosque que se estudiaron, se encontró que el sitio de bosque puro de *P. durangensis* tiene los individuos con mayor altura, mientras que el mayor diámetro lo presenta la asociación con *P. teocote*. Por otro lado, la asociación de *P. durangensis* con *Q. sideroxylla* posee la mayor cobertura de área de copa, siendo el único caso en el que se produjo un solapamiento de copas. En general, las copas de los pinos tienen menor área de cobertura y su forma es cilíndrica con relación a la copa de latifoliadas, propias de los bosques de encinos (Yirdaw y Luukkanen, 2004).

En la presente investigación, los parámetros estructurales se consideraron estrechamente asociados con la relación entre la mezcla, la diferenciación de tamaños y los patrones de distribución entre cada individuo y sus cuatro árboles vecinos adyacentes.

Los valores de *Ui-Wi* y *Mi-Wi* de la distribución bivariada de *P. durangensis* en asociación con otras especies revelaron que en los cinco sitios estudiados se muestra mayor frecuencia de árboles con distribución aleatoria ($Wi=0.50$) y pocas veces el grupo estructural de los cinco árboles presenta conespecificidad, a excepción del bosque puro. En este bosque los árboles de *P. durangensis* suelen ser los dominantes, aunque de manera general existe presencia de todas las clases sociales equitativamente en todas sus asociaciones. Estas características indican que las diferentes asociaciones de especies arbóreas presentan alta heterogeneidad. Diversos estudios señalan que la distribución aleatoria se da principalmente en bosques naturales o que han sufrido mínimas perturbaciones (Hui y Gadow 2003; Hui *et al* 2007). Zhang *et al* (1999) mencionan que durante el proceso de sucesión hasta el estado clímax, la comunidad forestal cambia gradualmente de agrupada a regular y el proceso está constantemente acompañado de un debilitamiento aleatorio de las asociaciones interespecíficas entre las especies dominantes. En México se han realizado estudios que registran bosques con distribución aleatoria en áreas que sufrieron intervenciones silvícolas (Aguirre *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2005). Por otro lado,

la heterogeneidad en los bosques se da debido a la competencia de las plantas conespecíficas por los recursos, y a las pioneras que en algunos bosques producen las condiciones necesarias, como sombra y refugio, para que otras especies crezcan, se establezcan y, después de varias etapas de sucesión, se logra que otras especies diferentes coexistan y ocupen los nichos ecológicos disponibles (Pommerening, 2002; Li *et al.*, 2012).

Los valores máximos de U_i-M_i y W_i-M_i alcanzaron un alto grado de mezcla (a excepción del bosque puro), registrándose mayores frecuencias de mezcla alta ($M_i = 0.75$) y muy alta ($M_i = 1$). En general *P. durangensis* se mezcla moderadamente ($M_i = 0.50$) en las asociaciones con otras especies, aunque al asociarse con *Q. sideroxyla* su grado de mezcla y dominancia se elevan considerablemente y la distribución se mantiene aleatoria. Por otro lado, al asociarse con *P. teocote*, esta última se presenta con mayor grado de mezcla ($M_i = 1$), con una dominancia alta ($U_i = 0.75$) y con tendencia al agrupamiento ($W_i = 0.75$). Según Wright (2002) la tendencia al agrupamiento es común en los bosques con árboles de dominancia alta. Es de señalar que en las áreas naturales protegidas es donde se han registrado mayores valores de mezcla (Corral *et al.*, 2013), disminuyendo en áreas que han sufrido algún tipo de alteración como incendios o actividades silvícolas (Rubio-Camacho *et al.*, 2017; Solís *et al.*, 2006)

Los valores de U_i-W_i y U_i-M_i mostraron que en todos los sitios se presentan todas las clases de dominancia diamétrica. No obstante, casi todas las especies tienden a ser dominantes ($U_i=0.75$) y muy dominantes ($U_i=1$). *P. durangensis* se mantiene como la especie con mayor dominancia en las diferentes asociaciones, aunque al asociarse con *P. cooperi* esta dominancia disminuye a costa del aumento de la de *P. cooperi* que, a su vez, presenta una mezcla alta con una distribución aleatoria. Al asociarse con *P. strobiformis*, esta última se presenta con mayor frecuencia de árboles suprimidos, con una mezcla muy alta y con una distribución aleatoria. Algunos investigadores señalan que los patrones de distribución aleatorios en los árboles dominantes se deben a una fuerte

competencia intra e interespecífica por los recursos (luz, agua, nutrientes) (He y Duncan, 2000; Boyden et al., 2005; Druckenbrod et al., 2005). Existen diferentes estudios que han registrado resultados similares, donde los individuos dominantes presentan distribución aleatoria (Condit et al., 2000; Wiegand et al., 2000; Salas et al., 2006).

La información aquí obtenida puede ser extrapolada a áreas adyacentes de la unidad muestral y ser utilizada en función del objetivo del plan de manejo forestal, ya que si por ejemplo se busca mantener la diversidad de especies y distribución aleatoria, será necesario promover el desarrollo del bosque hacia una mezcla de especies más alta, donde los árboles con mezcla baja serían los que se talarían o en caso de que los objetivos sean meramente de producción se talarían aquellos árboles que estén suprimidos, agrupados y con alto nivel de mezcla, esto para promover el crecimiento en diámetros de los árboles de la masa forestal y favorecer a la especie de interés comercial, todo esto dependiendo del producto que se busque obtener.

CAPÍTULO V
CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE
ESPECIES ARBÓREAS EN UN BOSQUE TEMPLADO DE
DURANGO, MÉXICO

CHANGES IN THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF
ARBOREAL SPECIES IN A TEMPERATE FOREST OF
DURANGO, MEXICO



Fotografía de un bosque típico del ejido San Esteban y Anexos.

Manuscrito sometido a la revista *Acta Botanica Mexicana* el 25 de febrero de 2019.

CAPÍTULO V

CAMBIOS EN LA COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE ESPECIES ARBÓREAS EN UN BOSQUE TEMPLADO DE DURANGO, MÉXICO

Resumen

El manejo forestal ocasiona cambios en la composición, estructura y funcionamiento del bosque. En este trabajo se evalúa el efecto del manejo forestal en la composición y estructura de especies arbóreas en un periodo de 10 años en bosque templado de Durango, Mexico. Los datos provienen de árboles con diámetro a la altura del pecho mayor o igual a 7.5 cm ubicados en sitios permanente que fueron evaluados en un intervalo de cinco años (2007, 2012 y 2017). Se definieron tres estratos de altura para cada año de medición bajo la metodología del índice de Pretzsch tomando en cuenta la altura mayor de cada medición. Se calcularon el índice de valor de importancia (*IVI*), riqueza y diversidad. A todas las variables dasométricas por estrato se les realizaron pruebas de comparación de medias entre evaluaciones. Aunque se presentó un aumento en área basal, volumen y cobertura, este no fue estadísticamente significativo. Los estratos II y III presentaron el mayor aumento en área basal y volumen. La cobertura fue mayor al 100 % presentando la mayor contribución el estrato III. La composición de especies fue muy similar en las tres mediciones, siendo el estrato III el más diversos. *Pinus durangensis*, es la especie de mayor importancia ecológica en los estratos I y II, mientras que *Quercus sideroxyla* presenta mayor relevancia en el estrato III. En conclusión, el manejo forestal de la comunidad evaluada mantiene la composición y diversidad de especies y aumenta el área basal y volumen.

Palabras clave: área basal, cobertura, diversidad, estratos, estructura vertical, volumen.

Abstract

Forest management causes changes in the composition, structure and functioning of the forest. In this paper, the effect of forest management on the composition and structure of tree species over a period of 10 years is evaluated in a temperate forest of Durango México. The data come from trees with a diameter at breast height greater than or equal to 7.5 cm located in permanent sites that were evaluated over a five-year interval (2007, 2012 and 2017). Three height strata were defined for each year of measurement under the Pretzsch index methodology taking into account the highest height of each measurement. The index of importance value (*IV*), wealth and diversity is calculated. All the dasometric variables by stratum were tested for comparison of means between evaluations. Although there was an increase in basal area, volume and coverage, this was not statistically significant. Strata II and III showed the greatest increase in basal area and volume. The coverage was greater than 100%, with the highest contribution being stratum III. The composition of species was very similar in the three measurements, with stratum III being the most diverse. *Pinus durangensis*, is the species of greatest ecological importance in strata I and II, while *Quercus sideroxylla* has greater relevance in stratum III. In conclusion, the forest management of the evaluated community maintains the composition and diversity of species and increases the basal area and volume.

Key words: basal area, coverage, diversity, strata, vertical structure, volume.

Introducción

Los bosques templados del mundo se encuentran en su mayoría en las regiones Neártica y Palearctica, formando parte del conjunto de vegetación típico de latitudes no tropicales, en donde el clima tiene su estacionalidad anual marcada y un invierno durante el cual la temperatura cae por debajo de 0°C (Olson *et al.*, 2001; Challenger, 2003). En México este tipo de bosque está asociado estrechamente con las zonas montañosas dado a la ubicación geográfica del país y a la relación que existe entre el clima y la altitud (Tamayo 1990; Sánchez *et al.*, 2003).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO) (2010), el 35 % de la superficie de México se encuentra ocupada por ecosistemas forestales, en donde la zona de mayor concentración de ecosistemas boscosos es la Sierra Madre Occidental (Challenger *et al.*, 2008). En esta región se presenta gran diversidad de asociaciones de *Pinus*, *Quercus* y *Arbutus* (González *et al.*, 2007). La importancia de este tipo de vegetación no es sólo por su alta diversidad, sino también porque las especies de *Pinus* y *Quercus* son los árboles de mayor interés económico (Sánchez *et al.*, 2003).

El manejo forestal maderable realizado en las últimas décadas ha sido muy selectivo, sobre todo en las mejores especies de árboles e individuos, ocasionando cambios en la composición, la estructura y la función del bosque. Este manejo crea condiciones de desarrollo para especies de mayor importancia económica y disminuye la proporción de especies de importancia ecológica por tener menor valor económico (Fregoso *et al.*, 2001; Hernández *et al.*, 2013; Hernández-Salas *et al.*, 2018). De tal forma que es necesario conocer cómo afectan las diferentes perturbaciones a la estructura del bosque y cómo avanza la sucesión secundaria una vez que la cubierta original ha sido modificada o directamente eliminada por causas antrópicas (Foster 1993). Franklin *et al.* (2002) mencionan que la información sobre la estructura del bosque contribuye a una mejor comprensión de la historia y potencial de desarrollo futuro de un ecosistema forestal.

La caracterización estructural constituye uno de los fundamentos principales para entender el funcionamiento de los ecosistemas, lo cual puede aportar elementos de decisión para contribuir al manejo adecuado de los bosques (Cascante y Estrada, 2001; Aguirre *et al.*, 2003; Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). La variación estructural de las poblaciones forestales depende en gran medida de la composición de especies de las comunidades, de tal forma que una misma especie puede presentar diferente condición estructural de acuerdo con la asociación florística donde se encuentra coexistiendo (Johnson *et al.*, 2002).

La estructura horizontal de los bosques está dada por la abundancia, distribución y dominancia de las especies que lo conforman con respecto a la masa boscosa total, por lo que los parámetros más usados para medir la estructura son la densidad de árboles y el área basal (Rubio *et al.*, 2014). Verticalmente se pueden distinguir tres estratos arbóreos: el estrato alto o superior, el estrato medio y el estrato bajo o inferior (Richards, 1966; Lamprecht, 1977; Pretzsch, 2009).

La información derivada de sitios permanentes (aquellas medidas al menos tres veces sucesivas) constituyen una fuente de información importante en manejo e investigación forestal para conocer los cambios respecto al crecimiento, producción y evolución de las masas forestales (Gadow *et al.*, 1999; Kleinn y Morales, 2002). Una de las premisas del aprovechamiento sustentable es el mantenimiento de la composición e incremento del volumen maderable. El objetivo de la investigación es evaluar el efecto del manejo forestal en la composición (riqueza y diversidad de especies) y estructura (abundancia, área de copa, volumen e índice de Pretzsch) de especies arbóreas en un periodo de 10 años. La hipótesis es que el aprovechamiento forestal realizado mantiene la composición de especies e incrementa el área basa y volumen.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en el ejido San Esteban y Anexos, municipio de Pueblo Nuevo, ubicado en la parte suroeste del estado Durango, en el macizo montañoso de la Sierra Madre Occidental (noroeste de México). Está enmarcada

geográficamente entre los paralelos 23° 42' 34,48" y 23° 49' 28,18" de latitud Norte y los meridianos 105° 30' 11,83" y 105° 40' 6,56" de longitud Oeste (Figura 1).

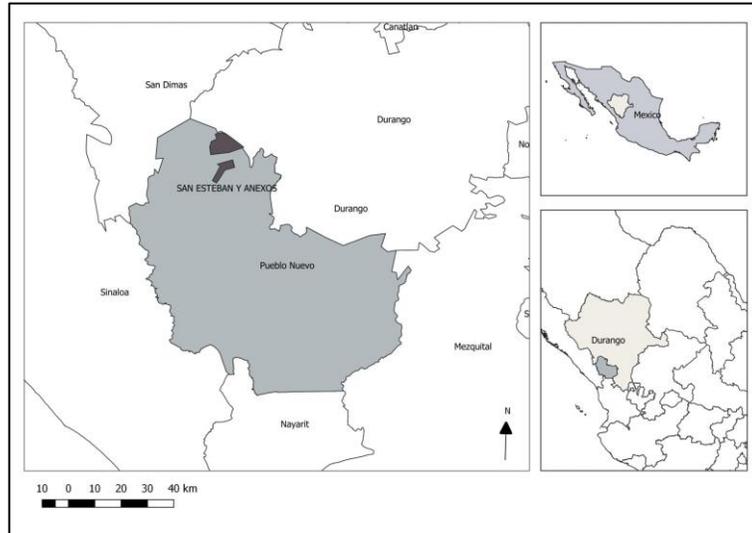


Figura 1. Localización del área de estudio.

La altura sobre el nivel del mar varía entre 2400 m y 2600 msnm con un promedio ponderado de 2500 m de altura. Los tipos de suelo presentes son litosol, cambisol y regosol con textura predominantemente gruesa a media. El tipo de roca predominante es ígnea extrusiva ácida (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2010). En esta zona prevalecen climas de tipo (A)C(W2), C(W2), C(E)(M) y C(E)(W2), la precipitación promedio media anual es de 1200 mm y la temperatura es de 18 °C (INEGI, 2009). Los tipos de vegetación predominantes corresponden a formaciones naturales de bosques de *Pinus* y *Pinus-Quercus*.

Los datos dasométricos para el estudio se tomaron de ocho parcelas permanentes de muestreo, de forma cuadrangular de 2 500 m². Las parcelas se establecieron en el 2007 siguiendo las metodologías desarrolladas por Corral-Rivas *et al.* (2009), y fueron evaluadas en un intervalo de cinco años (2007, 2012 y 2017). Las variables dasométricas medidas fueron diámetro normal (cm), altura total (m), diámetro de copa (m) y se registró la especie a la que pertenecía cada

individuo de acuerdo con sus características y estructura (García y González, 1998). Estas mediciones se realizaron en los ocho sitios, a todos los árboles con diámetro normal ($d_{1,30}$) ≥ 7.5 cm.

Análisis de datos

Para la caracterización de la estructura vertical de las especies se utilizó el índice de distribución vertical de especies (A) el cual es una modificación del índice Shannon (Pretzsch, 1996; Del Río *et al.*, 2003). Donde A tiene valores entre cero y un valor máximo (A_{max}); cuando un valor $A = 0$ significa que el rodal está constituido por una sola especie que ocurre en un solo estrato. Para la estimación de distribución vertical de las especies, se definieron las zonas de altura (Jiménez, 2001): zona I (alta): 80 a 100 % de la altura máxima del área; zona II (media): 50 a 80 % de la altura máxima, y zona III (baja): de cero a 50 % de la altura máxima. El índice se estima mediante la fórmula:

$$A = - \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^Z p_{ij} * \ln(p_{ij})$$

$$A_{max} = \ln(S * Z)$$

donde S = número de especies presentes; Z = número de estratos de altura; p_{ij} = porcentaje de especies en cada zona, y se estima mediante la siguiente ecuación $p_{ij}=n_{i,j}/N$; donde $n_{i,j}$ = número de individuos de la misma especie (i) en la zona (j) y N = número total de individuos. El valor de A se estandariza de la siguiente forma:

$$A_{rel} = \frac{A}{\ln(S * Z)} * 100$$

En cada uno de los estratos de altura se caracterizó la estructura horizontal; se determinó su abundancia, de acuerdo con el número de árboles, su dominancia, en función del área basal, y su frecuencia con base en su presencia en los sitios de muestreo. Las variables relativizadas se utilizaron para obtener un valor ponderado a nivel de especie denominado Índice de Valor de Importancia (IVI), que adquiere valores porcentuales en una escala de cero a 100 (Mostacedo y Fredericksen 2000). Las fórmulas para estos cálculos se describen a continuación.

$$A_i = N_i / E$$

$$AR_i = \left(\frac{A_i}{\sum_{i=1..n} A_i} \right) \times 100$$

donde A_i es la abundancia absoluta, AR_i es la abundancia relativa de la especie i respecto a la abundancia total, N_i es el número de individuos de la especie i , y E la superficie de muestreo (ha).

La dominancia (área basal) relativa se evaluó mediante:

$$D_i = Ab_i / E(ha)$$

$$DR_i = \left(\frac{D_i}{\sum_{i=1..n} D_i} \right) \times 100$$

donde D_i es la dominancia absoluta, DR_i es dominancia relativa de la especie i respecto a la dominancia, Ab el área basal de la especie i y E la superficie (ha).

La frecuencia relativa se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$F_i = P_i / NS$$

$$FR_i = \left(\frac{F_i}{\sum_{i=1..n} F_i} \right) \times 100$$

donde F_i es la frecuencia absoluta, FR_i es la frecuencia relativa de la especie i respecto a la suma de las frecuencias, P_i es el número de sitios en el que está presente la especie i y NS el número total de sitios de muestreo.

El índice de valor de importancia (IVI) se define como (Whittaker 1972, Moreno 2001):

$$IVI = \frac{AR_i + DR_i + FR_i}{3}$$

También se determinó la cobertura total (área de copa) y por estrato en las tres mediciones:

$$C_i = Ac_i / E(ha)$$

donde C_i es la cobertura absoluta, Ac el área basal de la especie i y E la superficie (ha).

Para cada una de las especies se determinó su volumen rollo total árbol utilizando las ecuaciones de Shumacher y Hall sugeridas por Contreras y Návar (1997) las cuales se utilizan para estimar el volumen de las principales especies arbóreas en la Sierra Madre Occidental (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones para estimar volumen rollo total árbol de Shumacher y Hall (Contreras y Návar, 1997; 2002) para diferentes especies de pinos y hojosas de la Sierra Madre Occidental.

Especie	Ecuación
<i>Pinus cooperi</i> C.E.Blanco	$V=0.00004010*(DN^{1.9515})*(H^{0.9786})$
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	$V=0.00001771*(DN^{2.1441})*(H^{1.0383})$
<i>Pinus engelmannii</i> Carrière	$V=0.00006498*(DN^{1.8561})*(H^{0.9701})$
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	$V=0.00006815*(DN^{1.8346})*(H^{0.9319})$
<i>Pinus teocote</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	$V=0.00035377*(DN^{1.4896})*(H^{0.8052})$
Otras coníferas (<i>Pinus</i> sp. y <i>Juniperus</i> sp.)	$V=0.00024698*(DN^{1.6254})*(H^{0.8550})$
Otras hojosas (<i>Quercus</i> sp. y <i>Arbutus</i> sp.)	$V=0.00024732*(DN^{1.6169})*(H^{1.0941})$

Donde; V=Volumen ($m^3 ha^{-1}$); DN=Diámetro normal (m); H=Altura total (m).

La diversidad alfa se determinó con la riqueza de especies y el índice de diversidad de especies de Shannon-Wiener (H') (Moreno, 2001; Leyva, *et al.*, 2010).

A cada parámetro dasométrico se le constató la distribución normal (prueba de Shapiro-Wilk) y homocedasticidad de los datos (prueba de Levene), para usar el ANOVA de un factor o, en su ausencia, su equivalente, la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, bajo la hipótesis nula de igualdad de medias entre evaluaciones. En caso de diferencias significativas se usaron las pruebas de comparaciones múltiples de Tukey. El nivel de significancia para todas las pruebas fue $\alpha=0.05$. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa SPSS 22.0 para Windows.

Resultados

En total se registraron 16 especies distribuidas en cuatro géneros y cuatro familias. Las familias Pinaceae y Fagaceae fueron la más representadas con seis especies cada una. En total estas dos familias integraron 12 especies lo que representa el 75 % de la vegetación registrada en el área de estudio (Tabla 2).

Tabla 2. Nombre científico y común, y familia de especies arbóreas registradas en el área de estudio.

Nombre científico	Nombre común	Familia
<i>Arbutus arizonica</i> (A. Gray) Sarg.	Madroño liso	Ericaceae
<i>Arbutus madrensis</i> S. González	Madroño roñoso	Ericaceae
<i>Arbutus tessellata</i> P.D. Sørensen	Madroño pegajoso	Ericaceae
<i>Juniperus deppeana</i> Steud.	Táscate	Cupressaceae
<i>Pinus cooperi</i> C.E. Blanco	Pino chino	Pinaceae
<i>Pinus durangensis</i> Martínez	Ocote	Pinaceae
<i>Pinus engelmannii</i> Carrière	Pino real	Pinaceae
<i>Pinus leiophylla</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	Pino prieto	Pinaceae
<i>Pinus strobiformis</i> Engelm.	Pino blanco	Pinaceae
<i>Pinus teocote</i> Schied. ex Schltdl. & Cham.	Pino colorado	Pinaceae
<i>Quercus arizonica</i> Sarg.	Encino	Fagaceae
<i>Quercus conzattii</i> Trel.	Encino negro	Fagaceae
<i>Quercus crassifolia</i> Bonpl.	Encino prieto	Fagaceae
<i>Quercus obtusata</i> Bonpl.	Encino roble	Fagaceae
<i>Quercus rugosa</i> Née	Encino blanco	Fagaceae
<i>Quercus sideroxylo</i> Bonpl.	Encino colorado	Fagaceae

Índice de distribución vertical

Por el índice de distribución vertical (*A*) se definieron tres estratos de altura para cada año de medición tomando en cuenta la altura mayor de cada medición, la cual aumentó en promedio 1.5 m cada cinco años. Para la primera medición (2007) el estrato I (19.9 – 24.9 m) incluyó 41 árboles ha⁻¹ distribuidos en seis especies, lo que equivale al 5.7 % de la zona. En el estrato II (12.5 – 19.8 m) se registraron 169 árboles ha⁻¹ distribuidos en 14 especies que representan el 23.7 % de la zona. El estrato III (< 12.4 m) se conformó por 505 árboles ha⁻¹ distribuidos en las 16 especies totales, lo que representó el 70.7 % de la zona. Por otro lado, en la segunda medición (2012) en el estrato I (21.1 – 26.4 m) disminuyó el número de individuos a 25 árboles ha⁻¹ en cuatro especies representado el 3.6 % de la zona. En el estrato II (13.2 – 21.0 m) el número de individuos aumentó a 177 árboles ha⁻¹ distribuidos en las mismas 14 especies del

2007 representando el 25.8 % de la zona. En el estrato III (< 13.1 m) el número de individuos disminuyó a 484 árboles ha⁻¹ distribuidos en las 16 especies representando el 70.7 % de la zona. En la última medición (2017) el estrato I (22.2-27.8 m) disminuyó en número de individuos, pues se registraron 18 árboles ha⁻¹, pero aumento el número de especies a cinco, representado el 2.5 % de la zona. En el estrato medio (13.9-22.1 m) el número de individuos disminuyó a 171 árboles ha⁻¹ distribuidos en 10 especies que también disminuyeron respecto a la medición anterior representando el 24 % de la zona. Mientras tanto en el estrato bajo (2.3-13.8 m) el número de individuos aumento considerablemente a 525 árboles ha⁻¹ distribuidos en las 16 especies originales, lo que representa el 73.5%. Las especies *P. cooperi*, *P. durangensis*, *P. teocote* y *Q. sideroxyla* estuvieron presentes en todos los estratos de altura en las tres mediciones, donde su proporción de individuos fue mayor en el estrato bajo (III) y disminuyo en el estrato alto (I) (Tabla 3).

El valor del índice de Pretzsch (*A*) para el año 2007 fue de $A=2.72$ con un $A_{max}=3.87$ y un $A_{rel}=70\%$, para los siguientes años estos valores presentaron una disminución mínima, para el año 2012 fueron de $A=2.67$ con un $A_{max}=3.87$ y un $A_{rel}=69\%$, mientras que para el 2017 los valores fueron de $A=2.66$ con un $A_{max}=3.87$ y un $A_{rel}=68\%$.

Tabla 3. Valores del índice vertical de Pretzsch.

Especie	2007		2012		2017	
	N ha ⁻¹	(%)	N ha ⁻¹	(%)	N ha ⁻¹	(%)
Estrato I	(19.9 - 24.9 m)		(21.1 - 26.4 m)		(22.2 - 27.8 m)	
<i>P. cooperi</i>	5	0.7	4	0.6	4	0.5
<i>P. durangensis</i>	25	3.5	16	2.3	11	1.5
<i>P. leiophylla</i>	1	0.1	-	-	-	-
<i>P. teocote</i>	6	0.8	3	0.4	2	0.3
<i>P. strobiformis</i>	1	0.1	-	-	1	0.1
<i>Q. sideroxyla</i>	3	0.4	2	0.2	1	0.1
Suma	41	5.7	25	3.6	18	2.5
Estrato II	(12.5-19.8)		(13.2 - 21.0 m)		(13.9 - 22.1 m)	
<i>A. madreensis</i>	1	0.1	1	0.1	-	-
<i>A. tessellata</i>	1	0.1	1	0.1	-	-
<i>J. deppeana</i>	1	0.1	1	0.1	2	0.2
<i>P. cooperi</i>	14	1.9	16	2.3	14	1.9
<i>P. durangensis</i>	72	10.1	75	10.9	77	10.8
<i>P. leiophylla</i>	9	1.2	6	0.9	6	0.8
<i>P. teocote</i>	22	3.0	27	3.9	26	3.6
<i>P. engelmannii</i>	3	0.4	3	0.4	3	0.4
<i>P. strobiformis</i>	13	1.8	17	2.4	17	2.3
<i>Q. arizonica</i>	1	0.1	1	0.1	1	0.1
<i>Q. crassifolia</i>	1	0.1	1	0.1	-	-
<i>Q. rugosa</i>	1	0.1	1	0.1	-	-
<i>Q. sideroxyla</i>	31	4.3	29	4.2	27	3.8
<i>Q. conzattii</i>	3	0.3	1	0.1	1	0.1
Suma	169	23.7	177	25.8	171	24.0
Estrato III	(2.0 - 12.4 m)		(2.5 - 13.1 m)		(2.3 - 13.8 m)	
<i>A. madreensis</i>	28	3.9	27	3.9	29	4.1
<i>A. arizonica</i>	10	1.3	5	0.7	5	0.7
<i>A. tessellata</i>	12	1.6	12	1.7	13	1.8
<i>J. deppeana</i>	20	2.8	19	2.8	26	3.6
<i>P. cooperi</i>	7	1.0	5	0.7	7	0.9
<i>P. durangensis</i>	98	13.6	100	14.6	103	14.4
<i>P. leiophylla</i>	25	3.4	24	3.4	26	3.6
<i>P. teocote</i>	25	3.5	22	3.2	27	3.7
<i>P. engelmannii</i>	4	0.6	4	0.6	5	0.6
<i>P. strobiformis</i>	35	4.9	37	5.4	50	7.0
<i>Q. arizonica</i>	8	1.1	8	1.2	9	1.2
<i>Q. crassifolia</i>	13	1.8	13	1.9	15	2.1
<i>Q. rugosa</i>	3	0.3	3	0.4	5	0.6
<i>Q. sideroxyla</i>	180	25.2	166	24.2	166	23.3
<i>Q. conzattii</i>	39	5.5	41	5.9	42	5.9
<i>Q. obtusata</i>	1	0.1	1	0.1	1	0.1
Suma	505	70.7	484	70.7	525	73.5
Suma total	715	100.0	685	100.0	714	100.0

Índice de valor de importancia (*IV*) por estrato.

La abundancia no presentó cambios significativos del año 2007 al 2017 ($F=0.051$; $g.l.=2$; $P=0.950$), en el 2007 el promedio N (\pm desviación estándar) fue de 715 ± 211 árboles ha^{-1} , disminuyendo levemente en el 2012 a 685 ± 200 árboles ha^{-1} , mientras que en el 2017 el valor fue 714 ± 217 árboles ha^{-1} . Los estratos no mostraron diferencias significativas. El estrato I disminuyó levemente del 2007 (54 ± 41 árboles ha^{-1}) al 2017 (36 ± 15 árboles ha^{-1}), *P. durangensis* fue la especie de mayor abundancia en el 2007 (25 árboles ha^{-1}), la cual disminuyó en 56 % en

la última medición (11 árboles ha⁻¹). La abundancia en el estrato II fue constante del 2007 (169 ± 73.8 árboles ha⁻¹) al 2017 (171 ± 113 árboles ha⁻¹), *P. durangensis* presentó el mayor valor (72 árboles ha⁻¹) sin presentar cambios considerables a través del tiempo. El estrato III presentó un aumento del 2007 (505 ± 237 árboles ha⁻¹) al 2017 (525 ± 212 árboles ha⁻¹), *Q. sideroxylla* fue la especie más abundante (180 árboles ha⁻¹), disminuyendo su presencia en 8 % en las siguientes mediciones (166 árboles ha⁻¹) (Tabla 4, Figura 2a).

El área basal total (dominancia) del arbolado no presentó cambios significativos del año 2007 al 2017 ($F=0.670$; $g.l.=2$; $P=0.522$). En el 2007 el promedio fue de 18 ± 5.66 m² ha⁻¹ el cual aumentó en las siguientes mediciones hasta alcanzar 27.07 ± 8.11 m² ha⁻¹ en 2017. Los estratos no mostraron cambios significativos. El estrato I mantuvo un valor constante (5.97 ± 3.62 m² ha⁻¹ en 2007 y 5.47 ± 2.19 m² ha⁻¹ en 2017), la mayor dominancia fue la de *P. durangensis* en 2007 (2.24 m² ha⁻¹), la cual disminuyó en el 2017 (1.49 m² ha⁻¹). El II aumento del 2007 (7.48 ± 3.00) al 2017 (11.35 ± 6.75 m² ha⁻¹), la especie *P. durangensis* presentó mayor dominancia, sin embargo, aquí aumentó conforme paso el tiempo (2.49 a 4.27 m² ha⁻¹). El estrato III presentó un aumento del 2007 (8.03 ± 3.33 m² ha⁻¹) al 2017 (9.98 ± 3.84 m² ha⁻¹), *Q. sideroxylla* fue la más dominante, aumentado su área basal del año (3.25 a 3.65 m² ha⁻¹) (Tabla 4, Figura 2b).

La frecuencia evalúa el número de *N* veces que una especie se presenta en los sitios de muestreo. Las especies *P. durangensis* y *P. teocote* fueron las que se presentaron en mayor cantidad de sitios en el estrato I del 2007 (cinco sitios), frecuencia que disminuyó en la última medición. En el estrato II *P. durangensis* se presentó en todos los sitios de muestreo (8 sitios) en las tres mediciones, seguida de *Q. sideroxylla* que se estuvo en la totalidad de sitios de la primera medición, pero disminuyó su frecuencia en las siguientes. En el estrato III *Q. sideroxylla* se presentó en todos los estratos de las tres mediciones, mientras que *P. durangensis* estuvo en todos los sitios del 2007 y solo en siete de las siguientes mediciones (Tabla 4).

Con base en las variables anteriores se calculó el *IVI*, siendo *P. durangensis* la especie con mayor peso ecológico en el estrato I en las tres mediciones (46 %, 55.7 % y 48.6 %), seguida de *P. teocote* en 2007 y 2012 (19 % y 17.6 %), mientras que en el 2017 *P. cooperi* fue la segunda en importancia ecológica (18.5 %). En el estrato II *P. durangensis* siguió siendo la especie con mayor peso ecológico en las tres mediciones con valores de 31.3 %, 31.4 % y 34.6 % respectivamente, seguida de *Q. sideroxylla* con valores de 21.7 %, 20.0 % y 20.4 % respectivamente en las tres mediciones. Por otro lado, en el estrato III *Q. sideroxylla* fue la especie de mayor importancia ecológica con valores mayores a 27 % en las tres mediciones, seguida de *P. durangensis* con valores de 15 % (Tabla 4).

Cobertura

El área de copa total del arbolado no presentó cambios significativos del año 2007 al 2017 ($F=2.238$; $g.l.=2$; $P=0.131$) el promedio para 2007 fue de $10251.39 \pm 3051.07 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, mientras que para el 2012 disminuyó a $9388.77 \pm 2348.02 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ y para el 2017 aumentó a $13333.83 \pm 5594.38 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Los estratos no presentaron cambios significativos. En el estrato I el promedio de 2007 fue de $2443.17 \pm 1539.79 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ el cual disminuyó en el 2017 donde registró un valor de $1816 \pm 685.33 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. En el estrato II el promedio para 2007 fue de $3523.30 \pm 1388.15 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$, el cual aumentó considerablemente hasta 5456.93 ± 3971.65 en 2017. Para el estrato III se presentó un promedio para el 2007 de 4895.72 ± 2254.66 , mientras que para el 2017 aumentó considerablemente a $6968 \pm 2815.23 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ (Figura 2c)

Tabla 4. Parámetros estructurales estimados para las especies registradas en el área de estudio por estrato en cada año de medición.

Especie	2007				2012				2017			
	Ar (%)	Dr (%)	Fr (%)	IVI (%)	Ar (%)	Dr (%)	Fr (%)	IVI (%)	Ar (%)	Dr (%)	Fr (%)	IVI (%)
Estrato I												
<i>P. cooperi</i>	12.3	11.8	10.5	11.6	16.3	14.7	16.7	15.9	19.4	16	20	18.5
<i>P. durangensis</i>	61.7	50	26.3	46	65.3	60.2	41.7	55.7	61.1	54.7	30	48.6
<i>P. leiophylla</i>	1.2	0.7	5.3	2.4	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>P. teocote</i>	14.8	15.9	26.3	19	12.2	15.5	25	17.6	11.1	14.2	20	15.1
<i>P. strobiformis</i>	2.5	1.3	10.5	4.8	-	-	-	-	2.8	1.5	10	4.8
<i>Q. sideroxyla</i>	7.4	20.3	21.1	16.3	6.1	9.7	16.7	10.8	5.6	13.6	20	13
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Estrato II												
<i>A. madrensis</i>	0.3	0.5	2.2	1	0.6	0.5	4.5	1.9	-	-	-	-
<i>A. tessellata</i>	0.3	1	2.2	1.2	0.3	0.8	2.3	1.1	-	-	-	-
<i>J. deppeana</i>	0.6	1.3	2.2	1.4	0.6	1.1	2.3	1.3	0.9	1.5	2.6	1.7
<i>P. cooperi</i>	8	6.7	8.9	7.9	8.8	6.5	9.1	8.1	7.9	6.3	5.3	6.5
<i>P. durangensis</i>	42.6	33.4	17.8	31.3	42.5	33.6	18.2	31.4	45	37.6	21.1	34.6
<i>P. leiophylla</i>	5	4.9	11.1	7	3.4	3.5	11.4	6.1	3.5	3.6	10.5	5.9
<i>P. teocote</i>	12.7	11.4	15.6	13.2	15	14.1	15.9	15	15.2	15.2	18.4	16.3
<i>P. engelmannii</i>	1.8	1.4	4.4	2.5	1.7	1.2	4.5	2.5	1.5	1	5.3	2.6
<i>P. strobiformis</i>	7.7	7.1	8.9	7.9	9.3	7.2	9.1	8.5	9.6	7.3	13.2	10
<i>Q. arizonica</i>	0.3	0.5	2.2	1	0.3	0.4	2.3	1	0.3	0.4	2.6	1.1
<i>Q. crassifolia</i>	0.6	0.6	2.2	1.2	0.3	0.2	2.3	0.9	-	-	-	-
<i>Q. rugosa</i>	0.3	0.9	2.2	1.1	0.3	0.6	2.3	1.1	-	-	-	-
<i>Q. sideroxyla</i>	18.3	29	17.8	21.7	16.4	30	13.6	20	15.8	26.9	18.4	20.4
<i>Q. conzattii</i>	1.5	1.2	2.2	1.6	0.6	0.4	2.3	1.1	0.3	0.2	2.6	1
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Estrato III												
<i>A. madrensis</i>	5.5	4.1	9.1	6.3	5.5	3.8	9.5	6.3	5.5	4.4	10.2	6.7
<i>A. arizonica</i>	1.9	3.5	4.5	3.3	1	2.6	4.8	2.8	1	1.4	1.7	1.3
<i>A. tessellata</i>	2.3	1.4	4.5	2.8	2.4	1.6	4.8	2.9	2.5	2.6	5.1	3.4
<i>J. deppeana</i>	4	4.5	10.6	6.4	3.9	4.5	11.1	6.5	4.9	4.7	11.9	7.1
<i>P. cooperi</i>	1.4	1.7	3	2	1	1	1.6	1.2	1.2	1.5	1.7	1.5
<i>P. durangensis</i>	19.3	14.3	12.1	15.2	20.7	15.8	11.1	15.9	19.5	14.8	11.9	15.4
<i>P. leiophylla</i>	4.9	5.3	7.6	5.9	4.9	5.1	7.9	6	4.9	5.1	6.8	5.6
<i>P. teocote</i>	5	4.5	10.6	6.7	4.5	4	11.1	6.5	5.1	4.8	11.9	7.2
<i>P. engelmannii</i>	0.8	0.6	4.5	2	0.8	0.7	4.8	2.1	0.9	1.1	3.4	1.8
<i>P. strobiformis</i>	6.9	5.3	10.6	7.6	7.6	5.3	11.1	8	9.5	6.5	10.2	8.7
<i>Q. arizonica</i>	1.6	1.7	1.5	1.6	1.7	1.9	1.6	1.7	1.6	1.9	1.7	1.8
<i>Q. crassifolia</i>	2.6	4.5	1.5	2.9	2.7	5.1	1.6	3.1	2.9	4.8	1.7	3.1
<i>Q. rugosa</i>	0.5	0.4	3	1.3	0.5	0.4	3.2	1.4	0.9	1.3	3.4	1.8
<i>Q. sideroxyla</i>	35.6	40.4	12.1	29.4	34.3	39.3	12.7	28.8	31.6	36.6	13.6	27.3
<i>Q. conzattii</i>	7.7	7.6	3	6.1	8.4	8.5	1.6	6.2	8	8.4	3.4	6.6
<i>Q. obtusata</i>	0.1	0.2	1.5	0.6	0.1	0.2	1.6	0.6	0.1	0.2	1.7	0.7
Suma	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Suma general	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300	300

Ar = Abundancia relativa; Dr = Dominancia relativa (área basal); Fr= Frecuencia relativa. IVI = Índice de Valor de Importancia.

Volumen

El volumen total del arbolado presentó un aumento, pero no significativo del año 2007 al 2017 ($F=0.517$; $g.l.=2$; $P=0.604$), para el 2007 el promedio fue de $197.89 \pm 93.99 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, el cual aumentó en 2017 a $245.57 \pm 109.48 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Los estratos no mostraron cambios significativos El promedio para el estrato I en 2007 fue de 64.14 ± 38.81 , el cual disminuyó levemente a $62.19 \pm 28.35 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en 2017. En el

estrato II el promedio para el 2007 fue de $76.48 \pm 35.69 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ aumentando considerablemente en 2017 a $117 \pm 78.59 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$. Para el estrato III el promedio para 2007 fue $73.31 \pm 36.29 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ aumentando a $97.00 \pm 44.26 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ en el 2017 (Figura 4d).

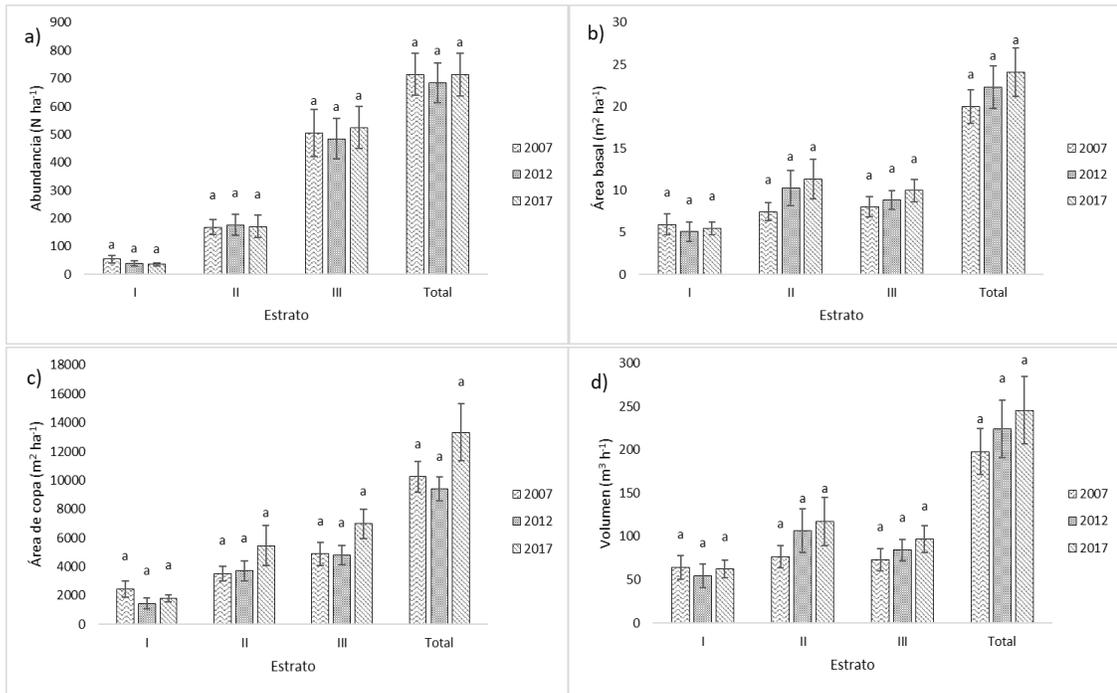


Figura 2. Valores por estratos y totales de a) Número de árboles por ha (N ha^{-1}); b) Área basal ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$); c) Área de copa ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$); d) Volumen total árbol ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Valores promedios \pm error estándar. Letras diferentes (a, b) indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Distribución por clases diamétricas

En el número de árboles ha^{-1} por clase diamétrica se observa que el estrato bajo (III), donde se registró la mayor cantidad de individuos, es quien define la tendencia del gráfico; se muestra un comportamiento decreciente (J-invertida) en las tres mediciones, presentándose mayor abundancia de árboles en las clases diamétricas menores y decreciendo conforme aumentan estas. El estrato II tienen un comportamiento similar, pero a menor escala, mientras que en el estrato alto (I) la mayor cantidad de árboles ha^{-1} se encuentra en las categorías mayores (Figura 3).

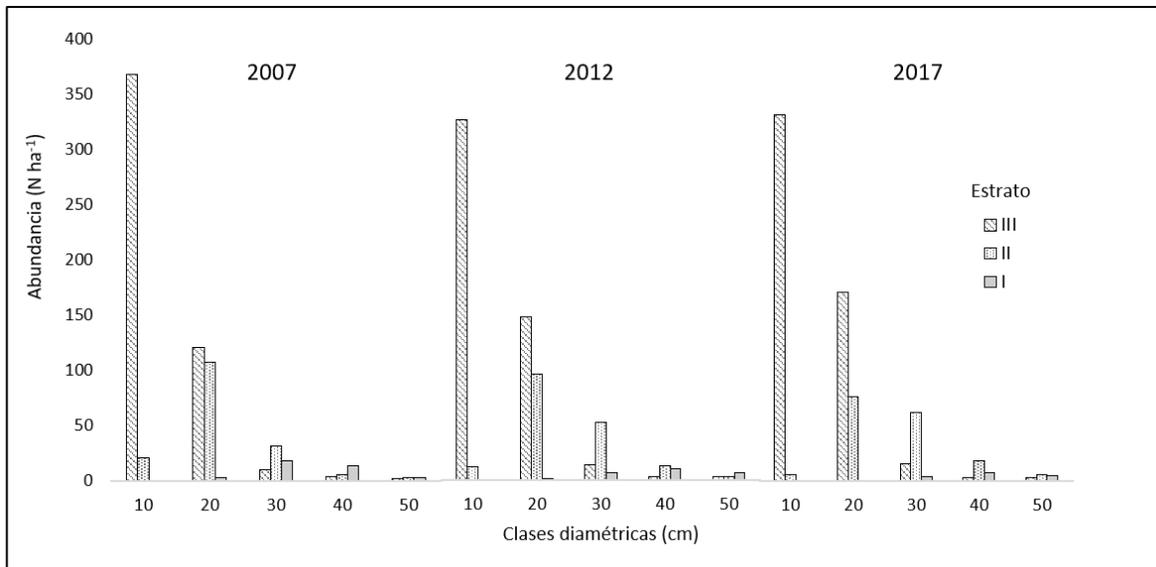


Figura 3. Distribución de individuos ($N\ ha^{-1}$) por clase diamétrica por estrato para los años 2007, 2012 y 2017.

Análisis de riqueza y diversidad

La riqueza de especies total (S) no presentó cambios significativos del año 2007 al 2017 ($F=1.054$; $g.l.=2$; $P=0.366$), el promedio para 2007 fue de 8.8 ± 1.28 especies el cual disminuyó a 7.88 ± 1.46 especies en el 2017. Los estratos no presentaron cambios. En el estrato I en el 2007 el promedio fue de 2.38 ± 0.98 especies disminuyendo a 1.25 ± 0.58 especies en 2017. El estrato II el valor de 2007 fue de 5.63 ± 0.91 especies, valor que disminuyó a 4.75 ± 0.71 especies en 2017. Para el estrato III el promedio para 2007 fue de 8.25 ± 1.48 especies, disminuyendo a 7.36 ± 1.69 especies en 2017 (Figura 4a).

La diversidad total del índice de Shannon (H') no presentó cambios significativos del año 2007 al 2017 ($F=0.028$; $g.l.=2$; $P=0.973$) el valor promedio para 2007 fue de 1.54 ± 0.26 , mientras que para el 2017 fue muy similar (1.57 ± 0.22). los estratos no presentaron cambios significativos. El valor del estrato I para 2007 fue de 0.61 ± 0.27 , disminuyendo en las siguientes mediciones hasta registrar un valor de 0.33 ± 0.21 en 2017. El promedio para el estrato II para 2007 fue de 1.33 ± 0.28 , disminuyendo a 1.24 ± 0.30 en 2017. Para el estrato III en el 2007 el valor promedio fue de 1.48 ± 0.27 manteniéndose similar en las siguientes mediciones (1.48 ± 0.34) (Figura 4b).

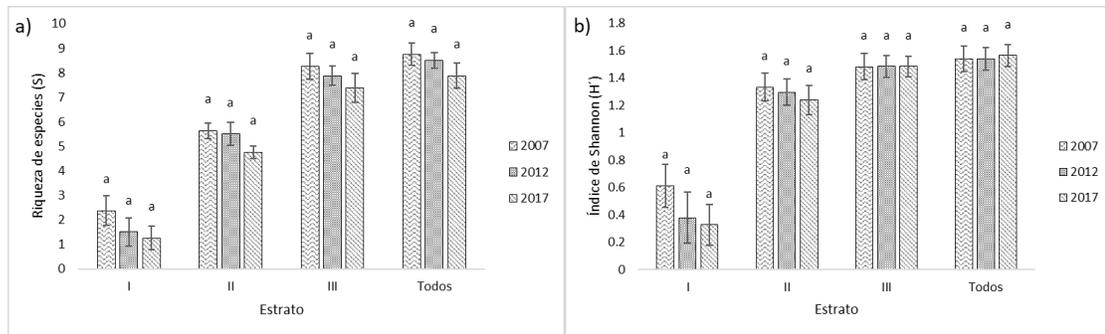


Figura 4. a) Riqueza de especies por estrato y total; b) Índice de Shannon por estrato y total. Valores promedios \pm error estándar. Letras diferentes (a, b,) indican diferencia significativa ($P < 0.05$).

Discusión

La extracción de madera y el pastoreo son las actividades que más daño causan en el bosque, cambiando la estructura y desarrollo de estos (Ávila y López, 2001; Cuevas-Guzmán *et al.*, 2011; López-Hernández *et al.*, 2017)

La estructura general del bosque templado estudiado se caracteriza por tener amplia presencia de las familias Pinaceae y Fagaceae, las cuales han sido registradas como unas de las de mayor representatividad en los bosques templados de México (Aragón-Piña *et al.*, 2010; López *et al.*, 2017). La familia Pinaceae y el género *Pinus* son de gran distribución en todas las cadenas montañosas del país (García y González 1998; Hernández-Salas *et al.*, 2013).

Según Lamprecht (1986), el análisis de especies arbóreas se debe realizar mediante el estudio de los estratos en las copas. La altura máxima que alcanzaron los individuos localizados en el área de muestreo fue diferente en cada año de medición, aumentado de 24.9 m en 2007 a 27.8 m en 2017, a partir de las cuales se determinaron los tres estratos del índice A (Pretzsch, 2009; Aguirre, 2002). Los valores del índice A fueron muy similares en las tres mediciones ($A = 2.66$ con un $A_{max} = 3.87$ y un $A_{rel} = 68\%$). Lo que indica que la zona evaluada tiene una alta uniformidad y no presentó cambios considerables en la distribución de especies en los estratos de altura en el tiempo, siendo el estrato III el que presenta la mayor heterogeneidad. Los valores de A_{rel} cercanos

a 100 % indican que todas las especies se encuentran distribuidas de forma equitativa en los tres estratos de altura, mientras que un valor $A = 0$ significa que el rodal está constituido por una sola especie que ocurre además en un sólo estrato y A_{max} se alcanza cuando la totalidad de las especies ocurren en la misma proporción tanto en el rodal como en los diferentes estratos y depende del número de especies y de estratos. (Nagel, 1994; Pretzsch, 1996). Estos valores coinciden con Graciano *et al.* (2017) quienes registraron valores de $A = 2.07$ y $A_{max} = 3.58$ al caracterizar un bosque de la misma región y con Jiménez *et al.* (2001) que registraron valores similares ($A = 2.07$; $A_{max} = 3.50$) al analizar de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México.

En la densidad los cambios más notorios fueron por la muerte, tala e incorporación de individuos en las mediciones del 2012 y 2017, aun así, no se registraron cambios significativos, ya que el número de individuos fue constante a través del tiempo. Los estratos I y II se encuentran dominados por la presencia de la especie *P. durangensis* en las tres mediciones, esta se caracteriza por ser una de las que alcanza mayor altura en los bosques templados de México (hasta 42 m) (González-Elizondo *et al.*, 2012). Además, ha sido registrada en diversos estudios como la especie más abundante en los bosques templados de Durango (Noroeste de México) (Valenzuela-Núñez y Granados-Sánchez, 2009). El estrato III existe mayor presencia de *Q. sideroxylla* en las tres mediciones, esta especie junto con *P. durangensis* y *P. teocote* muestran una estrecha relación ya que se encuentran asociadas entre sí (González, 1998; Márquez *et al.*, 1999) y han sido documentadas como unas de las más frecuentes en los bosques templados (Silva-Flores *et al.*, 2014). Jiménez *et al.* (2001) encontraron que las distintas especies de *Quercus* se ubicaron de manera mínima en el estrato II y en mayor proporcionalidad en el estrato III al analizar la estructura de un bosque en el norte de México, coincidiendo con Villavicencio *et al.* (2005) que señalan que las especies del género *Quercus* son las dominantes en el estrato bajo. Cabe señalar que todas las especies arbóreas registradas en el área de estudio tuvieron presencia en el estrato inferior (III).

El área basal total aumento en las tres mediciones, sin embargo, el cambio no fue significativo, el estrato bajo (III) fue el de mayor aumento. Uno de los mejores indicadores para medir el grado de recuperación del bosque es el área basal (Norden *et al.*, 2009). Diversos autores señalan que el área basal de los bosques secundarios incrementa asintóticamente a través del tiempo y tiende a ser semejante a los bosques primarios. (Guariguata y Ostertag 2002; Ruschel *et al.*, 2009).

No se presentaron cambios relevantes en composición de especies en el área de estudio en las tres mediciones, la especie *P. durangensis* resultó ser la especie de mayor importancia ecológica, sin embargo, al analizar el *IVI* por estratos, resultó que *Q. sideroxylo* fue la que mayor relevancia presentó en el estrato III. Estos resultados concuerdan con Delgado *et al.* (2016) quienes registraron a *P. durangensis* y *Q. sideroxylo* como especies de mayor valor ecológico en bosques de la región a la del área de estudio.

Las copas producen y compiten por recursos, especialmente con árboles vecinos, pero quizás la competencia por espacio de crecimiento y radiación son las más importantes, ya que determinan el adecuado crecimiento y buen desarrollo de un árbol (Saavedra-Romero *et al.*, 2016). El área de copa total no presentó cambios significativos en los diferentes años de medición, pero esta fue mayor a $10\ 000\ \text{m}^2\ \text{ha}^{-1}$; es decir superior al 100 % de la superficie muestreada lo que significa una sobre posición de copas. El estrato III presentó el mayor aporte y aumento en las mediciones. López-Hernández *et al.* (2017) registró un valor menor ($8463\ \text{m}^2\ \text{ha}^{-1}$) en un bosque templado del centro de México.

El área de estudio presentó un aumento en volumen que no fue significativo (197.89 a $245.57\ \text{m}^3\ \text{ha}^{-1}$), siendo los estratos II y III los que presentaron el mayor aumento; en estos estratos se concentraron el mayor número de individuos de *Pinus* y *Quercus*. Autores como Návar y González (2009), señalan que el volumen aumenta con el índice de mezcla de *Pinus* y *Quercus*, y con el incremento en la densidad en bosques de Durango, México. Corral-Rivas *et al.*

(2015) registraron valores menores ($181.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en bosques mixtos e irregulares de Durango, México.

Se presentó una distribución de clases diamétricas de tipo *J* invertida en las tres mediciones, encontrándose gran cantidad de individuos en las categorías diamétricas menores que disminuyen en los mayores diámetros, dichos individuos jóvenes reemplazarán a arbóreos maduros en un futuro (Arruda *et al.*, 2011; Hernández-Stefanoni *et al.*, 2011). Este tipo de distribuciones diamétricas, es la mejor garantía de la supervivencia de la comunidad forestal, ya que los individuos de tallas superiores son eliminados ocasionalmente y sustituidos sin dificultad por individuos de las categorías diamétricas inferiores (Lamprecht, 1990). La desigualdad en los tamaños diamétricos es un efecto asociado a procesos competitivos que llevan a cabo las especies durante las diferentes etapas de desarrollo del rodal (Olvera-Vargas *et al.*, 2012).

No se presentaron cambios significativos en la riqueza total en las tres mediciones ($S = 8$ especies en promedio en cada sitio). El estrato I fue el que presentó menor número de especie, mientras que el III al agrupar mayor número de individuos permitió que el número de especies aumentara. Condit *et al.* (1996), menciona que las especies se acumulan en función del número de individuos muestreados. Estos valores fueron mayores a las 11 especies que López-Hernández *et al.* (2017) registraron en un bosque de Puebla, México.

Por otro lado, la diversidad en el área de estudio no presentó cambios significativos ($H' = 1.57$), la diversidad disminuyó ligeramente en los estratos I y II a través del tiempo, mientras que el estrato III fue de la mayor diversidad constante en las tres mediciones. López-Hernández (2017) registraron valores menores (1.37). En bosques con poca perturbación y mayor edad, generalmente se presentan alta diversidad de árboles y especies arbustivas (Onaindia *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

El estudio permitió obtener información referente a la estructura, composición y diversidad de los bosques del Estado de Durango, México. El bosque del ejido La Campana (vegetación arbórea) presenta una baja riqueza específica y diversidad de especies; sin embargo, al compararla con otros estudios realizados en bosques de la Sierra Madre Occidental, se puede decir que el área estudiada presenta mayor diversidad. La familia más representativa fue Pinaceae con cinco especies, seguida de la familia Ericaceae con cuatro especies. Las especies con mayor índice de valor de importancia e índice forestal fueron *Pinus durangensis* y *Quercus sideroxylla*, ambas presentaron altos valores de cobertura aérea, diámetro, altura y volumen. Los valores obtenidos de los índices utilizados indican tendencia a la heterogeneidad del ecosistema. Los resultados obtenidos en el presente trabajo pueden ser utilizados como base en el desarrollo de planes de investigación, conservación, manejo y uso sustentable de los recursos forestales.

Por otro lado, en el ejido La Victoria las especies de las familias Pinaceae y Fagaceae son las más frecuentes y abundantes. Estas especies presentan las alturas y diámetros de mayores dimensiones, por consiguiente, son las que en conjunto mayores existencias reales de volumen proveen. Mediante la aplicación de ecuaciones alométricas es posible estimar el volumen, biomasa y carbono de estos bosques. La biomasa y carbono acumulado en las especies arbóreas del área de estudio es similar a lo registrado en otras zonas de la Sierra Madre Occidental, pero mayor en comparación a lo registrado en otras regiones de México. Las especies con mayor volumen, biomasa y carbono acumulado fueron *Pinus durangensis*, *P. cooperi* y *Quercus sideroxylla*. El área estudiada tiene un elevado potencial de biomasa y para la captura de carbono.

Al evaluar el efecto de dos tratamientos silvícolas. Se presentaron diferencias en la composición y estructura. El sitio con cortas de selección presentó mayor número de especies, mayor densidad y área basal. Existe una notable presencia de regeneración en ambos sitios por lo que los árboles con menores diámetros son más abundantes, sin embargo, en el sitio con cortas de regeneración hay mayor densidad de dichos árboles. Se presentó una distribución irregular de

individuos con tendencia a la agrupación con ambos tratamientos, lo cual es común en áreas bajo manejo o perturbadas. En el sitio con el tratamiento de cortas de regeneración se presentó mayor grado de mezcla, por lo que la mayor proporción de los árboles de este sitio tienen vecinos de especies diferentes. La mayor diferenciación dimensional en diámetros y alturas la presentó el sitio con cortas de selección, en donde se pueden encontrar mayor número de individuos de diferentes dimensiones. En los dos sitios existen todas las clases sociales representadas, desde árboles suprimidos hasta muy dominantes, tanto en diámetro como en altura, pero solo en el sitio de cortas de regeneración están claramente definidos el estrato de árboles padre y el de regeneración.

Al analizar la distribución espacial de cinco asociaciones de bosques se logró proporcionar información sintetizada de las características estructurales bivariadas (mezcla entre especies arbóreas, patrones de distribución y competencia entre individuos) de cinco asociaciones diferentes de *Pinus durangensis*, lo cual está estrechamente relacionado con la fase de desarrollo del bosque en cuestión. De manera general se presenta una distribución aleatoria en todos los sitios, lo cual es un indicador del estado de sucesión existente en el área de estudio, donde *P. durangensis* en su mayoría, es la especie de mayor relevancia, presentando mayor altura y mayor diámetro, pero que al asociarse con otras especies modifica considerablemente la estructura del bosque. De esta forma el bosque de *P. durangensis-P. teocote* presenta una dominancia muy alta, una mezcla alta y una elevada tendencia al agrupamiento, lo cual solo difiere en la distribución aleatoria que mantiene el bosque de *P. durangensis-P. cooperi*. Por su parte el bosque de *P. durangensis-P. strobiformis* tiende a ser diferente en la amplia presencia de árboles suprimidos que en él coexisten, mientras que la asociación de *P-durangensis-Q. sideroxila* mantuvo la dominancia alta, presentando un solapamiento de copas, situación que no ocurrió en las otras asociaciones.

La información obtenida de la combinación de las variables estructurales ayuda a mejorar la comprensión de la estructura espacial del bosque, y además de

contribuir a la regulación de la intensidad de corta y garantizar una gestión sostenible, también puede apoyar el desarrollo de planes de investigación, conservación y uso sustentable de los recursos forestales.

En cuanto al análisis de los cambios de estructura en el tiempo se determinó que el manejo forestal de la comunidad evaluada mantiene la composición y diversidad de especies y aumenta el área basal y volumen. La composición de especies en el área estudiada fue muy similar en las tres mediciones, se registraron 16 especies pertenecientes principalmente a las familias Pinaceae y Fagaceae, siendo el género *Pinus* el de mayor representatividad. La altura máxima aumentó en promedio 1.5 m cada 5 años. De acuerdo con los valores del índice vertical (*A*) existe alta uniformidad, no hay cambios considerables en distribución de especies en los tres estratos de altura a través del tiempo y el estrato III tiene mayor heterogeneidad. Las especies con mayor contribución estructural son *P. durangensis* y *Q. sideroxylla*, la importancia de la primera recae en los estratos I y II, mientras que la segunda presenta mayor relevancia en el III. La cobertura fue mayor al 100 % y aumentó conforme paso el tiempo, indicando una sobreposición de copas, presentando la mayor contribución el estrato III. Los estratos II y III presentaron el mayor aumento en volumen, reflejo de la densidad existente en estos.

Se presentó una distribución de clases diamétricas de tipo *J* invertida, lo que garantiza la supervivencia de esta comunidad forestal. Los valores de riqueza y diversidad no mostraron cambios significativos, pero tienden a disminuir con el paso del tiempo, aun así, son altos en comparación con otros bosques similares. Las especies registradas se distribuyeron de diferente forma en los estratos, siendo el estrato III el más diverso.

Lo obtenido en esta investigación sirve como referencia para el desarrollo de planes de manejo silvícola, investigación, conservación y uso sustentable de los recursos forestales aportando información respecto a la composición, estructura, volumen, biomasa, contenido de carbono y los cambios existentes en el bosque y sus estratos a través del tiempo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., y Díaz-Lavariega, M. (2009). Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et cham. *Terra Latinoamericana*, 27(2), 105-114. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000200003
- Aguilar-Hernández, L., García-Martínez, R., Gómez-Miraflor, A. y Martínez-Gómez, O. (2016). *Estimación de biomasa mediante la generación de una ecuación alométrica para madroño (Arbutus xalapensis)*. IV Congreso Internacional y XVIII Congreso Nacional de Ciencias Agronómicas. Chapingo, Estado de México, México.
- Aguirre, O. (2004). Índices para la caracterización del estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Ciencia Forestal en México*, 27(92), 5-27.
- Aguirre, O. A., Hui, G., Von Gadow, K., y Jiménez, J. (2003). An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables. *Forest Ecology and Management*, 183(1), 137-145. doi: 10.1016/S0378-1127(03)00102-6
- Aguirre, O. A., Kramer, H., y Jiménez, J. (1998). Strukturuntersuchungen in einem kiefern-durchforstungsversuch nord-mexikos. *Allgemeine Forst- Und Jagdzeitung*, 169, 213-219.
- Aguirre, O., Corral, J., Vargas, B., y Jiménez, J. (2008). Evaluación de modelos de diversidad-abundancia del estrato arbóreo en un bosque de niebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(3), 281–289.
- Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Kramer, H., y Akça, A. (2003). Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia UANL*, 6(2), 219-225.

- Albert, M. (1999). *Analyse der eingriffsbedingten struktur- veränderung und durchforstungsmodellierung in mischbeständen* (Vol. 6). Gotingan, Alemania; Hainholz Verlag.
- Aragón-Piña, E. E., Garza-Herrera, A., González-Elizondo, M. S., y Luna-Vega, I. (2010). Composición y estructura de las comunidades vegetales del rancho El Durangueno, en la Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 81(3), 771-787. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532010000300018&lng=es&tlng=es
- Arruda, D. M., Brandao, D. O., Costa, F. V., Tolentino, G. S., Brasil, R. D., D'ângeloneto, S. N., y Nunes-Ferreira, Y. R. (2011). Structural aspects and floristic similarity among tropical dry forest fragments with different management histories in Northern Minas Gerais, Brazil. *Revista Árvore*, 35, 131-142.
- Ávila, C. H., y López, L. (2001). Distribución y análisis estructural de *Abies hickelii* (flous & gaussen) en México. *Interciencia*, 26 (6), 244-251.
- Ávila, G., Jiménez, F. J., Beer, Gómez, M., y Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales en Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 8(30), 32-35. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11554/5765>
- Ayala, R., Jong, B. H., y Ramírez, H. (2001). Ecuaciones para estimar biomasa en la meseta central de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 7(2), 153-157. Obtenido de <https://chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=MTEzNw==>
- Berger, A. L., y Puettmann, K. J. (2000). Overstory composition and stand structure influence herbaceous plant diversity in the mixed aspen forest of northern Minnesota. *Am Midl Nat.* 143(1), 111-125.

- Boyden, S., Binkley, D., y Shepperd, W. (2005). Spatial and temporal patterns in structure, regeneration, and mortality of an old-growth ponderosa pine forest in the Colorado Front Range. *Forest Ecology and Management*, 219, 43-55.
- Brown, S., Gillespe, J. R., y Lugo, A. E. (1989). Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 35(4), 881-902. doi:10.1093/forestscience/35.4.881
- Brown, S., Sathaye, J., Cannell, M., y Kauppi, P. E. (1996). Mitigation of carbon emissions to the atmosphere by forest management. *The Commonwealth Forestry Review*, 75(1), 80-91.
- Bye, R. (2005). Prominence of the Sierra Madre Occidental in the biological diversity of Mexico. In L. F. De Bano, A. Ffolliott, G. J. Ortega Rubio, R. H. Gottfried y C. B. Hamre (Eds.), *Biodiversity and management of the Madrean archipelago: The sky islands of Southwestern United States and Northwestern Mexico* (pp. 19–27). Tucson, AZ.: United States Department of Agriculture Forest Service, General Technical Report RM. doi: 10.2737/RM-GTR-264
- Cairns, M. A., Haggerty, P. K., Alvarez, R., De Jong, B. H. J., y Olmsted, I. (2000). Tropical Mexico's recent land-use change: A region's contribution to the global carbon cycle. *Ecological Applications*, 10, 1426-1441. doi:10.1890/1051-0761
- Canham, C. D., Finzi, A. C., Pacala, S. W. y Burbank, D. H. (1994). Causes and consequences of resource heterogeneity in forests: interspecific variation in light transmission by canopy trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 24(2), 337-349.
- Cano, C. J. (1988). *El sistema de manejo regular en los bosques de México*. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México.

- Cascante, M. A., y Estrada A. Ch. (2001). Composición florística de un bosque húmedo premontano en el valle central de Costa Rica. *Rev. Bio. Trop.*, 49 (1), 213-225.
- Castellanos-Bolaños, J. F., Treviño-Garza, E. J., Aguirre-Calderón, O. A., Jiménez-Pérez, J., Musalem-Santiago, M. y López-Aguillón, R. (2008). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques*, 14(2), 51-63.
- Challenger, A. (2003). Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación In O. Sánchez, E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (eds.), *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México. Diplomado en conservación, manejo y aprovechamiento de vida silvestre* (pp. 17-44). México; Instituto Nacional de Ecología, Semarnap.
- Challenger, A., y J. Soberón. (2008). *Los ecosistemas terrestres, en Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. México; Conabio.
- Clark, D. A., Brown, S., Kicklighter, D.W., Tomlison, J. Q., y Ni, J. (2001). Measuring net primary production in forests; concepts and field methods. *Ecological Applications* 11(2), 356-370. doi:10.1890/1051-0761.
- Clutter, J. L., Fors, J. C., Pienaar, L. V., Brister, G. H., y Bailey, R. L. (1983). *Timber management: A quantitative approach*. Nueva York N. Y. John Wiley & Sons, Inc.
- Condit, R., Ashton, P. S., Baker, P., Bunyavejchewin, S., Gunatilleke, S., Gunatilleke., ...y Yamakura T. (2000). Spatial patterns in the distribution of tropical tree species. *Science*, 288, 1414-1418.
- Condit, R., Hubbell, S., Lafrankie, J., R. Sukumar, R., Manokaran, N., Foster, B., Ashton, P. (1996). Species-Area and Species-Individual Relationships for

Tropical Trees: A Comparison of Three 50-ha Plots. *Journal of Ecology* 84(4), 549.

Contreras, A. J., y Návar, J. (1997). Ecuaciones de volumen para estimar volúmenes rollo total árbol, fustal, fuste y tocón y fuste y ramas de *Pinus durangensis* y *Pinus teocote* del ejido Vencedores, Dgo. Documento presentado en el Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Linares, Nuevo León, México.

Contreras, J. C., y Návar, J. (2002). Ecuaciones aditivas para estimar componentes de volumen para *Pinus teocote* de Durango, México. *Ciencia Forestal en México* 27, 67-82. Obtenido de <http://www.sidalc.net/repdoc/A11307e/A11307e.pdf>

Corella, F., Valdez, J. I., Cetina, V. M., González, F. V., Trinidad, A., y Aguirre, J. R. (2001). Estructura forestal de un bosque de mangles en el noreste del estado de Tabasco, México. *Ciencia Forestal en México*, 26(90), 73–102.

Corral S., Návar, J., y Fernández, F. (1999). Ajuste de funciones de ahusamiento a los perfiles fustales de cinco pináceas de la región de El Salto, Durango. *Madera y Bosques*, 5, 53-65. doi:10.21829/myb.1999.521347

Corral, J., Aguirre, O. A., Jiménez, J., y Corral, S. (2005). Un análisis del efecto del aprovechamiento forestal sobre la diversidad estructural en el Bosque Mesófilo de Montaña “El Cielo”, Tamaulipas, México. *Investigaciones Agrarias: Sistema de Recursos Forestales*, 14(2), 217– 228.

Corral-Rivas, J. J., Ávila-Márquez, H. L., Solís-Moreno, R., Vargas-Larreta, B., y Gadow, K. V. (2013). Esquema de monitoreo de la deforestación y la biodiversidad de los bosques mixtos e irregulares del estado de Durango. In Vargas-Larreta B. (eds) *Presente y Futuro de los Bosques* (pp 73-98). El Salto, Durango, México; UJED.

- Corral-Rivas, J. J., Wehenkel, C., Castellanos-Bocaz, H. A., Vargas-Larreta, B., y Diéguez-Aranda, U. (2010). A permutation test of spatial randomness: application to nearest neighbor indices in forest stands. *Journal of Forest Research* 15(4), 218–225.
- Corral-Rivas, J.J., Vargas, L. B., Wehenkel, C., Aguirre C. O., Álvarez, G. J., y Rojo, A. A. (2009). Guía para el establecimiento de sitios de investigación forestal y de suelos en bosques del estado de Durango. Durango, Dgo; Editorial UJED.
- Corral-Rivas, S., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas, J. J., Wehenkel, C., y López-Sánchez, C. A. (2015). Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 409-421.
- Cottam, G., y Curtis, J. T. (1956). The use of distance measures in phytosociological sampling. *Ecology*, 37, 451-460.
- Crow, T. R., Buckley, D. S., Nauertz, E. A., y Zasada, J. C. (2002). Effects of management on the composition and structure of northern hardwood forests in Upper Michigan. *For Sci.*, 48, 129-145.
- Cuevas-Guzmán, R., Cisneros-Lepe, E. A., Jardel-Peláez, E. J., Sánchez-Rodríguez, E. V., Guzmán-Hernández, L., Núñez-López, N. M. y Rodríguez-Guerrero, C. (2011). Análisis estructural y de diversidad en los bosques de Abies de Jalisco, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82, 1219-1233.
- De León-Mata, G. D., García, A., Andrade H., y Ruiz M. A. (2013). Distribución de la vegetación a través de un transecto sobre la Sierra Madre Occidental de Durango, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 30-40.

- Del Río, M., Montes, F., Cañellas, I. y Montero, G. (2003). Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(1), 159-176.
- Delgado, Z. D., Heynes, S. S., Mares, Q., Piedra, L., y Ruacho, G. L. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33), 94-107.
- Delgado-Zamora, D. A., Heynes-Silerio, S. A., Mares-Quiñones, M. D., Piedra-Leandro, N-L., Retana-Rentería, F. I., Rodríguez-Corral., ... y Ruacho-González, L. (2016). Diversidad y estructura arbórea de dos rodales en Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(33), 94-107.
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., Flores-Ayala, E., y Etchevers-Barra, J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*, 13(1), 25-34. doi.10.21829/myb.2007.1311233
- Druckenbrod, D. L., Shugart, H. H., y Davies, I. (2005). Spatial pattern and process in forest stands within the Virginia piedmont J. *Veg. Sci.*, 16 (1), 37-48.
- Emborg, J. (1998). Understorey light conditions and regeneration with respect to the structural dynamics of a nearnatural temperate deciduous forest in Denmark. *Forest Ecology and Management*, 106(2), 83-95.
- Felger, R. S., Johnson, M. B., y Wilson, M. F. (2001). *The trees of Sonora, Mexico*. New York, USA; Oxford University Press.
- Ferrari, J. B. (1999). Fine-scale patterns of leaf litterfall and nitrogen cycling in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(3), 291-302.

- Fonseca, W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales* 51(2), 91-109.
- Foster, P. (1993). *Digestion and absorption in Functional Physiology*. Butterworth Heinemann. pp.85-112.
- Franklin, J. F., Spies, T. A., Van Pelt, R., Carey, A. B., Thornburgh, D.A., Berg, D.R., ...y Chen, J. (2002). Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *For. Ecol. Manage*, 155, 399-423.
- Fregoso, A., Velásquez, A., Brocco, G., y Cortéz, G. (2001). El enfoque de paisaje en el manejo forestal de la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 46, 58-77.
- Füldner, K. (1995). *Strukturbeschreibung von Buchen – Edellaubholz–Mischwäldern*. Tesis doctoral. Universidad de Göttingen. Cuvillier Verlag Göttingen.
- Gadow, K. (1993). Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. *Forst und Holz*, 21, 601–606.
- Gadow, K. (1999). Waldstruktur und Diversität. *Allg Forst u Jagdztg*, 170, 117-122
- Gadow, K. V., Hui, G. Y., y Albert, M. (1998). Das Winkelmaß – ein Strukturparameter zur Beschreibung der Individualverteilung in Wald beständen. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 115, 1-9.
- Gadow, K. V., Rojo-Alboreca, A., Álvarez-González, J.G., y Rodríguez-Soalleiro, R. (1999). Ensayos de crecimiento. Parcelas permanentes, temporales y de intervalo. *Invest. Agr.: Sist. Recur. For*, 1, 229-310

- Gadow, K. V., Sánchez, O. S. & Álvarez, J. G. (2007). Estructura y crecimiento del bosque. Alemania; Universidad de Göttingen.
- Gadow, K., y Fuldner, K. (1992). Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung. Tagungsbericht der Arbeitsgruppe Forsteinrichtung. *Klieken bei Dessau, 1*, 122- 138.
- García A., A. y González E., M. S. (1998). *Pináceas de Durango*. Instituto de Ecología.
- Garreaud, R. (2011). Cambio Climático: Bases físicas e impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro (INIA-Chile)*, 93, 13–19. doi.10.15359/rca.51-2.5
- Gasparri, I., y Manghi, E. (2004). Estimación de volumen, biomasa y contenido de carbono de las regiones forestales argentinas. Argentina; Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Gómez-Mendoza, L., y Arriaga, L. (2008). *Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico*. *Conservation biology: the journal of the Society for Conservation Biology* (Vol. 21). doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00814.x
- González E., S. (1983). *La vegetación de Durango*. Durango, México; Instituto Politécnico Nacional.
- González, E., González, M., y Márquez, M. (2007). *Vegetación y ecorregiones de Durango*. México; Instituto Politécnico Nacional.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Ruacho-González, L., López-Enríquez, I. L., Retana-Rentería, F. I. y Tena-Flores, J. A. (2013). Ecosystems and diversity of the Sierra Madre Occidental. En G. J. Gottfried, P. F. Ffolliott, B. S. Gebow, y L. G. Eskew, (Comps). *Merging science and management in a rapidly changing world: biodiversity and management of the Madrean Archipelago III. Proceedings RMRS-P-67*. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., y López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100, 351- 403.
- González-Elizondo, S., González-Elizondo, M. y Cortes-Ortiz, A. (1993). Vegetación de la reserva de la biosfera “La Michilia”, Durango, México. *Acta Botanica Mexicana*, 22, 1-104. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57402201>
- Gracia, C., Vayreda, J., Sabaté, S., y Ibañez, J. (2004). *Main components of the aboveground biomass expansion factors*. CREAM, Centre de Recerca Ecological Aplicacions Forestals. Spain; University of Barcelona.
- Graciano-Ávila, G., Aguirre-Calderón, O., Alanís-Rodríguez, E., y Lujan-Soto, J. (2017). Composición, estructura y diversidad de especies arbóreas en un bosque templado del Noroeste de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 4(12), 535-542.
- Graz, F. P. (2006). Spatial diversity of dry savanna woodlands – assessing the spatial diversity of a dry savanna Woodland stand in northern Namibia using neighborhood-based measures. *Biodiversity Conservation*, 15, 1143–1157.
- Guariguata, M. R., y Ostertag, R. (2002). Sucesión secundaria. In: Biología y conservación de bosques neotropicales. In M. R Guariguata; GH Kattan. (Eds.), *Libro Universitario Regional (LUR)* (pp 591–624). CR; Cartago.
- Hamburg, S. P. (2000). Simple rules for measuring changes in ecosystem carbon in forestry-offset projects. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 5(1), 25-37.
- Hawley, R. C., y Smith, D. M. (1982). *Selvicultura práctica*. 2º edición. Barcelona; Ed. Omega.
- He, F., y Duncan, R. P. (2000). Density-dependent effects on tree survival in an oldgrowth Douglas fir forest. *J. Ecol.*, 88, 676-688.

- Hernández-Díaz, J. C., Corral-Rivas, J. J., Quiñones-Chávez, A., Bacon-Sobbe, J. R., y Vargas-Larreta, B. (2008). Evaluación del manejo forestal regular e irregular en bosques de la Sierra Madre Occidental. *Madera y bosques*, 14(3), 25-41.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A. y Domínguez-Pereda, A. (2013). Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(2), 189-200.
- Hernández-Salas, J., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís-Rodríguez, E., Jiménez-Pérez, J., Treviño-Garza, E. J., González-Tagle, M. A., Luján-Álvarez, C., Olivas-García, J. M., Domínguez-Pereda, A. (2018). Dinámica del crecimiento de un bosque templado bajo manejo en el noroeste de México. *Madera y Bosques*, 24(2).
- Hernández-Stefanoni, J. L., Dupuy, J. M., Tun-Dzul F., & F. May-Pat. (2011). Influence of landscape structure and stand age on species density and biomass of a tropical dry forest across spatial scales. *Landscape Ecology*, 26, 355-370.
- Hiura, T. (2001). Stochasticity of species assemblage of canopy trees and understory plants in temperate secondary forest created by major disturbances. *Ecol Res*, 16, 887–893.
- Hui, G. Y., Albert, M., y Chen, B. W. (2003). Reproduktion der Baumverteilung im Bestand unter Verwendung des Strukturparameters Winkelmaß. *Allgemeine Forst und Jagdzeitung*, 174, 109–116.
- Hui, G. Y., Albert, M., y Gadow, K. V. (1998). Das Umgebungsmab als parameter zur Nachbildung von bestandesstrukturen. *Forstwissenschaft Centralblatt*, 117, 258–266.

- Hui, G. Y., Gadow, K. V. y Albert, M. (1999). The neighborhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position. *Scientia Silvae Sinicae*, 35, 37–42.
- Hui, G. Y., Gadow, K. V., Hu, Y. B., y Xu, H. (2007). *Structure-based forest management*. Beijing, China; China Forestry Press.
- Hui, G. Y., y Gadow, K. V. (2003). *Quantitative analysis of forest spatial structure*. Beijing, China; China Science and Technology Press.
- Hui, G., y Gadow, K. (2002). Das Winkelman β -Herleitung des optimalen Standardwinkels. *Allg Forst u Jagdztg*, 173, 171176
- Hui, G., y Pommerening, A. (2014). Analysing tree species and size diversity patterns in multi-species uneven-aged forests of Northern China. *For Ecol Manage* 316, 125-138
- Husch, B. (2001). *Estimación del contenido de carbono de los bosques*. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales., Valdivia; Universidad Austral de Chile.
- Iglesias, M. R. y Barchuk, A. H. (2010). Estimación de la biomasa aérea de seis leguminosas leñosas del Chaco Árido. *Ecología Austral*, 20, 71-79. Obtenido de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1667-782X2010000100008&lng=es&tlng=e
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1984). *Carta topográfica. Escala 1:50,000 F13-A18*. El Salto, Durango, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (1988). Carta topográfica. Escala 1:50,000. El Salto, Durango. F13- A18 spp. México, D. F. Consultado 11-08.2017 en http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/historia/1_50_000/702825617394.pdf.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2010). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/default.aspx?o=1008858001>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Cartas temáticas del estado de Durango*. Aguascalientes, Aguascalientes, México.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). (2005). *Special report on Carbon Dioxide Capture and Storage (Prepared by working group III of the Intergovernmental Panel On Climate Change-IPCC)*. United Kingdom and New York. USA; Cambridge University Press, Cambridge.
- Ishii, H. T., Tanabe, S. I., y Hiura. T. (2004). Exploring the relationships among canopy structure, stand productivity, and biodiversity of temperate forest ecosystems. *For Sci*, 50, 342–355.
- Jaramillo, V. J., Kauffman, J. B., Renteria-Rodriguez, L., Cummings, D. L., y Ellingson, L. J. (2003). Biomass, carbon and nitrogen pools in Mexican tropical dry forest landscapes. *Ecosystems* 6, 609-629. doi:10.1007/s10021-002-0195-4
- Jardel, P. E. (2012). El Manejo Forestal en México: Estado actual y Perspectivas. In F, Chapela (Eds.), *Estado de los bosques de México* (pp 69–115). Ciudad de México; Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible.
- Jenkins, J. C., Birdsey, R. A., y Pan, Y. (2001). Biomass and NPP estimation for the mid-atlantic region (USA) using plotlevel forest inventory data. *Ecological Applications*, 11, 1174-1193. doi:0.1890/1051-0761
- Jiménez, J, Aguirre, O, Kramer, H. (1998). Bestandestrukturanalyse im ungleichaltrigen Kiefern- Wacholder- Eichen-Mischwald Nordostenmexikos. *Forstarchiv*, 69(6), 227-234.

- Jiménez, J., Aguirre, O., y Kramer, H. (2001). Análisis de la estructura horizontal y vertical en un ecosistema multicohortal de pino-encino en el norte de México. *Investigaciones Agrarias: Sistema de Recursos Forestales*, 10, 355-366.
- Jiménez-Pérez, J., Alanís-Rodríguez, E., Aguirre-Calderón, O., Pando-Moreno, M., y González-Tagle, M. (2009). Análisis sobre el efecto del uso del suelo en la diversidad estructural del matorral espinoso tamaulipeco. *Madera bosques* 15(3), 5-20.
- Johnson, P. S., Shifley, S. R., y Rogers, R. (2002). *The Ecology and Silviculture of Oaks.*, Oxford, U. K; CABI Publishing.
- Kleinn, C., y Morales, D. (2002). Consideraciones metodológicas al establecer parcelas permanentes de observación en bosque natural o plantaciones forestales. *Revista Forestal Centroamericana*. 39(40), 6-12.
- Kraft, G. (1884). *Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben.* Hannover; Verlag Keind-worth.
- Lamprecht, H. (1977). *Structure and function of South American Forests.* De: Ecosystem research in South America, Biogeographica, v.B. The Hague.
- Lamprecht, H. (1986). *Waldbau in den Tropen.* Hamburg u. Berlin; Paul Parey.
- Lamprecht, H. (1990). *Silvicultura en los trópicos. Los ecosistemas forestales en los bosques tropicales y sus especies arbóreas. Posibilidades y métodos para un aprovechamiento sostenido.* Eschborn; GTZ (GMBH).
- Ledo, A., Condés, S., y Montes, F. (2012). Revisión de índices de distribución espacial usados en inventarios forestales y su aplicación en bosques tropicales. *Revista Peruana de Biología*, 19(1), 113-124.

- Leyva, J. C., Velázquez, A., y Ángeles, G. (2010). Patrones de diversidad de la regeneración natural en rodales mezclados de pino. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 16, 227-239.
- Li, Y. F. (2013). The bivariate distribution of forest stand spatial structural parameters. *Chinese Academy of Forestry*, 1, 57–61.
- Li, Y., Hui, G., Zhao, Z., & Hu, Y. (2012). The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest. *Journal of Vegetation Science*, 23(6), 1180-1190.
- López-Hernández, J. A., Aguirre-Calderón, O. A., Alanís- Rodríguez, E., Monarrez-González, J. C., González- Tagle, M. A. y Jiménez-Pérez, J. (2017). Composición y diversidad de especies forestales en bosques templados de Puebla, México. *Madera y Bosques*, 23(1), 39-51. doi: 10.21829/myb.2017.2311518
- Magurran, A. E. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Oxford, UK: Blackwell Science.
- Maldonado, A., D. y Návar, C. J. (2002). Ajuste y predicción de la distribución Weibull a las estructuras diamétricas de plantaciones de pino de Durango, México. *Madera y Bosques*, 8(1), 61-72. doi: 10.21829/myb.2002.811306
- Margalef, R. (1972). Homage to Evelyn Hutchinson, or why there is an upper limit to diversity. *Connecticut Academy of Arts and Sciences*, 44, 211-235.
- Márquez L., M., González E., S. y Álvarez Z., R. (1999). Componentes de la diversidad arbórea en bosques de pino encino de Durango, Méx. *Madera y Bosques*, 5(2), 67-78. doi: 10.21829/myb.1999.521348
- Márquez-Linares, M. A. y González-Elizondo, M. S. (1998). Composición y estructura del estrato arbóreo de un bosque de pino encino en Durango, México. *Agrociencia*, 32(4), 413-419. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/322286514>

- Martínez-Antúnez, P., Wehenkel C., Hernández-Díaz, J.C., M. González-Elizondo, J.J. Corral-Rivas y Pinedo-Álvarez, A. (2013). Effect of climate and physiography on the density of trees and shrubs species in Northwest Mexico. *Polish Journal of Ecology*, 61(2), 283-295.
- Monárrez-González, J. C., y Ramírez-Maldonado, H. (2003). Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus durangensis* MTZ. en el estado de Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 9(1), 45-56.
- Montes de Oca-Cano, E., García-Ramírez, P., Nájera-Luna, J. A., y Méndez-González J. (2009). Ajuste de ecuaciones de biomasa para *Pinus durangensis* (Martínez M.) en la región de El Salto, Durango. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(1), 65-71. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000100008&lng=es&tlng=es
- Moreno, C. E. (2001). *Métodos para medir la biodiversidad. Manual y tesis SEA*. Vol. 1. Pachuca, Hidalgo, México; Editado por Cooperación Iberoamericana, Unesco y SEA.
- Mori, S. A., Boom, B. M., De Carvalho, A. M. y Dos Santos, T. S. (1983). Ecological importance of Myrtaceae in an eastern Brazilian wet forest. *Biotropica*, 15, 68-70.
- Mostacedo, B., y Fredericksen, S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestreo y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia; BOLFOR.
- Müeller-Dombois, D. y Ellenberg, H. (1974). *Aims and methods of vegetation ecology*. Nueva York, EUA: John Wiley and Sons.
- Müller-Using B. (1994). Contribución al conocimiento de los bosques de encino y pino-encino en el noreste de México. Reporte Científico No. 14. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León.

- Nagel, J. (1994). Structural Analyses of the Forest Reserve Saubrink on the Basis of a Permanent Sample Plot Data. Lousa & Coimbra, Portugal; Proceedings from the Symposium of the IUFRO Working Groups S4.01-03 and S4.01-04.
- Nájera, L. J. A., y Hernández, H. E. (2009). Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra Ximhai*, 52(2), 225-230. Obtenido de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/rxm/article/view/7016/6524>
- Nauertz, E. A, Crow, T. R, Zasada, J. C, y Teclaw, R. M. (2004). *Microclimatic variation between managed and unmanaged northern hardwood forests in Upper Michigan, USA*. Saint Paul, USA; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station.
- Návar, C. J. J., y González, G. S. (2009). Diversidad, estructura y productividad de bosques templados de Durango, México. *Polibotánica*, (27), 71-87. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682009000100005&lng=es&tlng=es
- Návar, J. (2009). Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest ecology and Management*, 257(2), 427-434. doi:10.1016/j.foreco.2008.09.028
- Návar, J. (2010). Alometría para biomasa en especies arbóreas del noroeste de México. *Trop Subtrop Agroecosyt*, 12, 507–519. Obtenido de <http://www.revista.ccba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/download/391/437>
- Návar, J., González, N., and Graciano, J. (2005). Carbon sequestration by forest plantations of Durango, México. *Madera y Bosques*, 11, 15-34. doi:10.21829/myb.2005.1121254

- Návar-Cháidez, J. D. J. (2010). Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques*, 16(1), 51-69. doi:10.21829/myb.2010.1611179
- Ni, Y., Eskeland, G. S., Giske, J., and Hansen, J. P. (2016). The global potential for carbon capture and storage from forestry. *Carbon Balance and Management*. 11(3), 1-8. doi:10.1186/s13021-016-0044-y
- Norden, N., Chazdon, R., Chao, A., Jland, Y., y Vílchez, B. (2009). Resilience of tropical rain forest, tree community reassembly in secondary forests. *Ecology Letters*, 12(5), 385–394.
- Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., ... & Loucks, C. J. (2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth A new global map of terrestrial ecoregions provides an innovative tool for conserving biodiversity. *BioScience*, 51(11), 933-938.
- Olvera-Vargas, M., y Figueroa-Rangel, B. L. (2012). Caracterización estructural de bosques montanos dominados por encino en el centro-occidente de México. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2).
- Onaindia, M., Domínguez, I., Albizu, I., Garbisu, C., y Amezaga, I. (2004). Vegetation diversity and vertical structure as indicators of forest disturbance. *Forest Ecology and Management*, 195, 341-354.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1998). FRA 2000-Términos y Definiciones. Programa de Evaluación de los Recursos Forestales. Documento de trabajo 1. www.fao.org/forestry/fo/fra/index.jsp
- Pacheco, E. F. C., Alderete Gómez, A., Fierros, G. A., Cetina-Alcalá V., y Vaquera-Huerta, H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia*

Mexicana, 30(3), 251–254. Obtenido de <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/30-3/5a.pdf>

Pimienta de la Torre, D., Domínguez, C. J., Aguirre, C. J., y Hernández, J. J. (2007). Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques*, 13(1), 35-46. doi:10.21829/myb.2007.1311234

Pommerening, A. (1997). *Eine Analyse neuer Ansätze zur Bestandesinventur in Strukturreichen Wäldern*. Dissertation, Forstl. Fakultät d. Universität Göttingen, Cuvillier Verlag, Göttingen.

Pommerening, A. (2002). Approaches to quantifying forest structures. *Forestry*, 75, 305–324.

Pommerening, A. (2006). Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis. *Forest Ecology and Management*, 224, 266–277.

Pommerening, A. (2012). CRANCOD: A Program for the Analysis and Reconstruction of Spatial Forest Structure. Obtenido de <http://www.crancod.org>

Pommerening, A. (2013). Woodland Structure Analysis and Modelling Lab. Obtenido de <http://www.crancod.org/wiki/index.php?title=Main>

Pommerening, A., y Stoyan, D. (2006). Edge-correction needs in estimating indices of spatial forest structure. *Canadian Journal of Forest Research*, 36, 1723–1739

Pretzsch, H. (1996). Strukturvielfalt als Ergebnis wald-baulichen Handelns. *Allg. Forst.-u. J.-Ztg.*, 167(11) ,213-221.

Pretzsch, H. (1998). Structural diversity as a result of silvicultural operations. *Lesnictví-Forestry*, 44(10), 429-439.

- Pretzsch, H. (2009). *Forest Dynamics, Growth and Yield*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Alemania; From Measurement to Model.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2011). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Obtenido de <http://www.R-project.org>
- Richards, P. (1966). *The Tropical rain forest, an ecological study*. Cambridge University.
- Rodríguez, R., Jiménez, J., Aguirre, O., y Jurado, E. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N.L. *Ciencia Forestal en México*, 32(101), 39-56. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11554/6093>
- Rubio, E. A., González, M. A., Jiménez, J., Aguirre, O. A., Ávila, D. Y., y Alanís, E. (2014). Diversidad y distribución vertical de especies mediante el índice de Pretzsch. *Ciencia UANL*, 17(65), 34-41.
- Rubio-Camacho, E. A., González-Tagle, M. A., Himmelsbach, W., Ávila-Flores, D. Y., Alanís-Rodríguez, E., y Jiménez-Pérez, J. (2017). Patrones de distribución espacial del arbolado en un bosque mixto de pino-encino del noreste de México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 88(1), 113-121.
- Ruschel, A., Mantovani, M., Sedrez, M., y Onofre, R. (2009). Caracterização e dinâmica de duas fases sucessionais em floresta secundária da Mata Atlântica. *Revista Árvore*, 33(1), 101–115.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. México, D.F., México; Ed. Limusa
- Saavedra-Romero, L., Alvarado-Rosales, D. P., Hernández-De, R., Martínez-Trinidad, T., Mora-Aguilera, G., y Villa-Castillo, J. (2016). Condición de copa, indicador de salud en árboles urbanos del Bosque San Juan de Aragón, Ciudad de México. *Madera y bosques*, 22(2), 15-27.

- Salas, P. C., Le May, V., Núñez, P., Pacheco, A. Espinosa. (2006). Spatial patterns in an old-growth *Nothofagus obliqua* forest in south-central Chile. *Forest Ecology Management.*, 231 (1–3), 38-46
- Sánchez, O., Vega, E., Peters, E., Monroy, V. O. (2003). *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*. México; Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT.
- Schroeder, P., Brown, S., Mo, J., Birdsey, R., y Cieszewski, C. (1997). Biomass estimation for temperate broadleaf forest of the United States using inventory data. *Forest Science*, 43(3), 424-434. Obtenido de <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US1997070561>
- Schulze, E. D., Wirth, C., y Heimann, M. (2000). Managing forests after Kyoto. *Science*, 289(5487), 2058-2059. doi:10.1126/science.289.5487.2058
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2005). *Control técnico de aprovechamientos*. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/64973/Informe_Chihuahua_2015.pdf
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2007). *Programa Estratégico Forestal 2030*, Durango, Dgo.: Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2016*. SEMARNAT, México D. F.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2001). México 2ª Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Comité Intersecretarial sobre Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE).

- Shannon, C. E. (1948). *The mathematical theory of communication*. Champaign, IL: University of Illinois Press.
- Silva-Arredondo, F. M., y Návar-Cháidez, J. D. J. (2009). Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 15(2), 155-160. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182009000200010&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Silva-Flores, R., Pérez-Verdín, G., y Wehenkel, C. (2014). Patterns of tree species diversity in relation to climatic factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *PLoS one*, 9(8), e105034. doi: 10.1371/journal.pone.0105034
- Solís, M. R., Aguirre, O. A., Treviño, E. J., Jiménez, J., Jurado, E., y Corral-Rivas J. (2006). Efecto de dos tratamientos silvícolas en la estructura de ecosistemas forestales en Durango, México. *Madera y Bosques*, 12(2), 49-64. doi: 10.21829/myb.2006.1221242
- Stavins, R., y Richards, K. (2005). *The cost of U.S. forest-based Carbon Sequestration*. USA; Pew Center on Global Climate Change.
- Tamayo, J. L. (1990). Geografía moderna de México. Trillas, México
- Teller, A. (1988) Biomass, productivity and wood waste evaluation in a Spruce (*Picea abies*) forest (Strinchmps 983). *Commonwealth Forestry Review*, 7(2), 129-148.
- UNEP. (1992). Convention on biological diversity. United Nations Environmental Program, Environmental Law and Institutions Program Activity Centre. Nairobi.
- Valenzuela-Núñez, L. M., y Granados-Sánchez, D. (2009). Caracterización fisonómica y ordenación de la vegetación en el área de influencia de El Salto, Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del*

Ambiente, 15(1), 29-41. Obtenido de
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n1/v15n1a4.pdf>

Vargas-Larreta, B., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas J. J., y Aguirre-Calderón, Ó. A. (2010). Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. *Revista fitotecnia mexicana*, 33(4), 343-350. Obtenido de

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802010000400012

Vega, M. V. S. (2008). El efecto invernadero. *Biocenosis*, 21(1-2). Obtenido de
<http://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/biocenosis/article/view/1274/1339>

Vilá, M., Vayreda, J., Comas, L., Ibáñez, J. J., Mata, T., y Obón, B. (2007). Species richness and wood production: a positive association in Mediterranean forests. *Ecol Lett*, 10(3), 241–250.

Villavicencio, G. R., Petersen, P. B., Rodríguez, A. G., Pérez, A. L. S., & Martínez, F. M. H. (2005). Caracterización estructural y diversidad de comunidades arbóreas de La Sierra de Quila. Ibugana. *Boletín del Instituto de Botánica*, 13(1), 67-76.

Von Ende, C.N. (1993). Repeated-measures analysis: Growth and other time dependent measures. In Scheiner, S. and I. Gurevitch (eds.) *The Design and Analysis of Ecological Experiments* (pp. 113-137). USA; Chapman and Hall.

Wehenkel, C., Brazão-Protázio, J. M., Carrillo-Parra, A., Martínez-Guerrero, J. H., y Crecente-Campo, F. (2015). Spatial Distribution Patterns in the Very Rare and Species-Rich *Picea chihuahuana* Tree Community (Mexico). *PLOS ONE*, 10(10), e0140442. doi:10.1371/journal.pone.0140442

Wenger, K. F. (1984). *Forestry Handbook*. New York, US; Wiley-Interscience.

- Whittaker, R. H. (1972). Evolution and measurement of species diversity. *Taxon*, 21, 213-251.
- Wiegand K., Jeltsch, F., Ward, D. (2000). Do spatial effects play a role in the spatial distribution of desert-dwelling *Acacia raddiana*? *J. Veg. Sci.*, 11 (4), 473-484.
- Wright, J. S. (2002). Plant diversity in tropical forests: A review of mechanisms of species coexistence. *Oecologia*, 130, 1–14.
- Yang, X., Yan, H., Li, B., Han, Y., y Song, B. (2018). Spatial distribution patterns of *Symplocos* congeners in a subtropical evergreen broad-leaf forest of southern China. *Journal of Forest Research* 29(3), 773–784.
- Yirdaw, E., y Luukkanen, O. (2004). Photosynthetically active radiation transmittance of forest plantation canopies in the Ethiopian highlands. *Forest Ecology and Management*, 188, 17-24.
- Zhang, J., Chen, L., Guo, Q., Nie, D., Bai, X., y Jiang, Y. (1999). Research on changes of dominant tree population distribution patterns during developmental processes of a climax forest community. *Acta Phytoecol*, 23, 256–268.