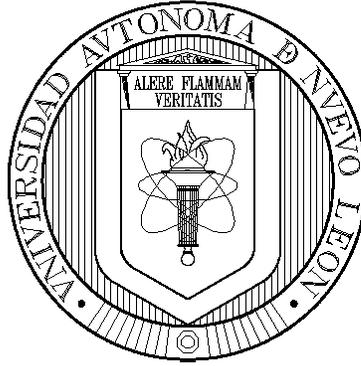


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**NUEVAS ALTERNATIVAS SILVÍCOLAS PARA EL
APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LOS BOSQUES
MIXTOS E IRREGULARES EN DURANGO, MÉXICO.**

POR:

JOSÉ ENCARNACIÓN LUJÁN SOTO

Como requisito parcial para obtener el grado de
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

ABRIL, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**NUEVAS ALTERNATIVAS SILVÍCOLAS PARA EL
APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LOS BOSQUES
MIXTOS E IRREGULARES EN DURANGO, MÉXICO**

POR:

JOSÉ ENCARNACIÓN LUJÁN SOTO

Como requisito parcial para obtener el grado de
**DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES**

ABRIL, 2021

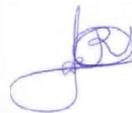
**NUEVAS ALTERNATIVAS SILVÍCOLAS PARA EL
APROVECHAMIENTO SUSTENTABLE DE LOS BOSQUES
MIXTOS E IRREGULARES EN DURANGO, MÉXICO.**

Aprobación de Tesis



Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón

Director



Dr. José Javier Corral Rivas

Codirector



Dr. Eduardo Javier Treviño Garza

Asesor



Dr. Marco Aurelio González Tagle

Asesor



Dr. Israel Yerena Yamallel

Asesor

ABRIL, 2021

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado para la realización de los estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y la Facultad de Ciencias Forestales, por abrirme las puertas para poder realizar mis estudios y brindarme todas las facilidades para llevar a cabo esta investigación.

Al Instituto Tecnológico de El Salto, por todas las facilidades otorgadas para la realización de este trabajo.

A la Universidad Juárez del Estado de Durango y el Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera, por el apoyo otorgado en esta investigación.

A la Unidad de Prestación de Servicios Ejidales de El Salto Dgo. A.C. por las facilidades otorgadas en la colecta de datos, el acceso a las instalaciones, áreas de estudio y al personal que labora en ella.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, por aceptarme como su tesista, desde la maestría, por estar al pendiente fuera y dentro de las actividades académicas, porque nunca escatimó esfuerzo, recurso y tiempo para generar, corregir y mejorar este trabajo, por cada una de las pláticas, por los mensajes positivos acerca de la vida. Gracias Doc. Oscar.

Al Dr. José Javier Corral Rivas, por su valiosa asesoría a lo largo de estos tres años, por el tiempo, comentarios y correcciones de cada uno de los manuscritos emanados de esta investigación. Gracias Compadre Corralito.

Al Profesor Klaus Von Gadow por ser parte fundamental de este trabajo de investigación por sus comentarios tan acertados para la culminación de los manuscritos que conforman esta investigación. Por su ejemplo al ver la vida con alegría y sentido familiar.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle por ser parte del comité de tesis, por sus comentarios en cada seminario y revisión de este documento, por su valioso tiempo y consejos.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza por ser parte del comité de tesis, por sus comentarios tan acertados para la culminación de esta investigación.

Al Dr. Israel Yerena Yamallel, por ser parte del comité de tesis, por su asesoría, por el tiempo dedicado a la revisión de esta tesis y sobre todo por las observaciones realizadas a los manuscritos.

A Claudia Valles Ortega, por cada uno de los momentos de desvelos compartidos durante esta investigación, por sus palabras de motivación que me hacen cada día ver la vida de otro modo.

Y a todas esas personas con las que conviví en la Facultad, que involuntariamente omito.

DEDICATORIA

A DIOS: Mi agradecimiento se dirige a quien ha forjado mi camino para guiarme por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento esta conmigo ayudando en todo momento y el es el guía de mi vida.

A MIS PADRES: Sra. Francisca Soto Gutiérrez y Sr. J. Encarnación Luján Puente por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, por sus enseñanzas, sus regaños, sus cuidados, comprensión y cariño, por motivarme a salir adelante en los proyectos emprendidos. Gracias por todo su apoyo y comprensión en todo momento.

A MIS HIJOS: Paula Vanessa, Alberto, Iker y Katherine Victoria por ser las personitas que me impulsan a seguir adelante, quienes me inyectan fortaleza y me motivan día a día para ser mejor.

A MI ESPOSA: Claudia Valles Ortega por brindarme todo su apoyo y amor en esta etapa de mi vida, por motivarme a mejorar y superarme cada día, esta meta es tuya también.

A MIS HERMANOS: Antonio, Esteban, Irma, Luis, Heri, Guera y Norma, por su apoyo, motivación y estar al pendiente en cada momento que lo necesito.

A MIS AMIG@S: MC Chuy Graciano, Karina Vega, Esteban Centeno, Bichis, Arturo Delgado, Néstor Gurrola, Lic. Navarrete, M.C. David Maldonado, y por su puesto al Dr. Tilo Gustavo Domínguez (Peje).

ÍNDICE

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
JUSTIFICACIÓN	2
HIPÓTESIS.....	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO I.	5
AGRUPACIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL EN DURANGO, MÉXICO.....	6
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
¿Por qué simplificar una comunidad forestal?	9
Métodos de agrupación de especies arbóreas	9
MATERIAL Y MÉTODOS	12
Datos.....	12
RESULTADOS	16
Estratificación vertical.....	18
Especie de subdosel o sotobosque permanente.....	20
DISCUSIÓN	21
Simplificando ecosistemas ricos en especies	21
El vínculo entre las características de las plantas y sus funciones.....	21
Preservación de la riqueza de especies y la diversidad de tamaños en ecosistemas manejados.....	22

La importancia ecológica de la actividad humana.....	23
AGRADECIMIENTOS.....	25
REFERENCIAS	26
CAPITULO II.	30
RESUMEN	31
ABSTRACT	32
INTRODUCCIÓN	33
OBJETIVO.....	36
MATERIALES Y MÉTODOS	36
Datos.....	36
Métodos	38
Definición de los niveles sugeridos de densidad	38
RESULTADOS	40
Nivel general o UMAFOR.....	40
Nivel predio	43
DISCUSIÓN	47
CONCLUSIONES	50
AGRADECIMIENTOS.....	51
REFERENCIAS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Se muestran las 16 especies del dosel arbóreo.	19
Tabla 2. Los estadísticos descriptivos de las principales variables de rodal obtenidas a partir del análisis de los sitios de muestreo utilizados en este trabajo.	38
Tabla 3. Estimadores de los parámetros del modelo utilizado para determinar los límites cuantílicos de clases de densidad residual en bosques de la UMAFOR 1008.	40
Tabla 4. Número de rodales clasificados por el tipo de densidad residual y nivel de productividad, a través del uso de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica.	42
Tabla 5. Número de rodales clasificados por el tipo de densidad residual y nivel de productividad, a través del uso de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ordenación del crecimiento en diámetro de 33 especies para las cuales se dispone de al menos 20 mediciones.	17
Figura 2. Dos gráficos típicos del modelo mixto y bivariado que fue ajustado sobre los datos para diferenciar entre individuos maduros e inmaduros de las especies de dosel, <i>Pinus arizonica</i> (izquierda) y <i>Pseudotsuga menziesii</i> (derecha). Las líneas representan los cuantiles (0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95) de la densidad bivariada.	18
Figura 3. Relación entre densidad y producción forestal según Assmann (1961).	34
Figura 4. Ubicación Localización de los sitios de muestreo y subrodas que fueron analizados en la presente investigación.	37
Figura 5. Límites de mínima y máxima densidad (líneas continuas) definidos por nivel de productividad a través de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica. Los diferentes colores indican el tipo de densidad residual de los rodales estudiados (negro = excesiva, rojo = sugerida y verde = deficiente).	41
Figura 6. Número de unidades de manejo en producción por predio y nivel de densidad residual observada en el nivel de productividad alto.	45
Figura 7. Número de unidades de manejo en producción por predio y nivel de densidad residual observada en el nivel de productividad medio.	46

RESUMEN

La Sierra Madre Occidental, es el hogar de cerca de cinco millones de hectáreas de bosques muy diversos. Alberga una gran variedad de especies de coníferas y latifoliadas, incluyendo 20 pinos y 43 especies de encinos. Más del 85 por ciento de la superficie forestal de Durango es de propiedad de comunidades rurales conocidas como ejidos y comunidades. Durante el siglo pasado, los bosques mixtos e irregulares de la Sierra Madre Occidental han sido objeto de diversas formas de aprovechamiento forestal selectivo por parte de las comunidades locales. Un elemento básico para el manejo de este tipo de bosques es la simplificación de las comunidades de árboles complejas mediante la agrupación de las especies maderables. La simplificación resultante crea una base sólida para un concepto de manejo que no prescribe la cantidad de la cosecha, sino simplemente la estructura del bosque residual que queda después de la cosecha. Después de una comparación de diferentes métodos para la agrupación de los bosques ricos en especies hay dos enfoques que logran el mismo resultado: a) grupos basados en relaciones de crecimiento en altura de las especies individuales, y b) un nuevo enfoque para la estratificación vertical. Este nuevo método de agrupación de especies podría ser la base para un mejor control de la cosecha y una mejor utilización de los bosques estudiados, y posiblemente también en otros bosques ricos en especies que se aprovechan de forma selectiva. Así, la agrupación de especies propuesta en este trabajo representa una alternativa que puede usarse como método de control para mantener existencias residuales por grupos de especies en niveles óptimos para una mejor utilización de la productividad de los bosques de la Sierra Madre Occidental.

Palabras clave: agrupación de especies, densidad residual óptima, Sierra Madre Occidental.

ABSTRACT

The Sierra Madre Occidental is home to about five million hectares of very diverse forests. A great variety of coniferous and broadleaved tree species, including 20 pine and 43 oak species, are known to occur in these forests. More than 85 percent of the forest area of Durango is owned by rural communities known as Ejidos and Comunidades. During the past century, the mixed and uneven-aged forests of the Sierra Madre Occidental have been subject to various forms of selective harvesting by the local communities. A basic element for the management of these types of complex forests is the simplification by means of grouping tree species. The resulting simplification generates a solid base for a management concept that does not propose the amount of harvest but simply the residual forest structure that remains after a silvicultural intervention. After comparing different methods for grouping species-rich forests, there are two approaches that reach the same result: a) groups based in height growth relationships of individual tree species, and b) a new approach of vertical stratification. This new method of species grouping may be the base for improving the harvest control of the studied forests, and perhaps also in other multi-species forests that are subject to selective management. Thus, the species grouping proposed in this study represent an alternative that may be used as a harvest control method to maintain residual stoking of species groups, in optimal levels to better use the productivity of the forests in the Sierra Madre Occidental.

Key words: species grouping, optimal residual stoking, Sierra Madre Occidental.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los resultados de esta investigación son presentados en 2 artículos científicos, uno de ellos ya publicado y el otro en preparación. El primer artículo se publicó en la revista Allgemeine Forst und Jagdzeitung, y hace un análisis y propuesta para la agrupación de especies como una opción para una mejor comprensión del funcionamiento de ecosistemas con alta diversidad en especies como los estudiados en este trabajo. La agregación de las especies en cohortes bien definidos también puede facilitar el modelado de la dinámica de estos ecosistemas ya que una alta diversidad de especies se asocia generalmente a la escasez de datos para algunas especies de distribución limitada que impide el desarrollo de modelos que requieren datos suficientes para su desarrollo. Por otro lado, la agrupación de especies representa una alternativa que puede usarse como método de control para mantener existencias residuales por grupos de especies en niveles óptimos para una mejor utilización de la productividad de los bosques de la Sierra Madre Occidental.

En un segundo artículo se estudió la importancia de la relación entre el número de árboles residuales y la producción como una teoría fundamental de la ecología de la producción forestal y la silvicultura cuantitativa. En esta teoría la "densidad óptima" es la densidad que produce el volumen máximo, mientras que la "densidad crítica" es esa densidad que todavía alcanza el 95% de la producción potencial máxima. Por lo tanto, una densidad del soporte por debajo de la densidad crítica implicaría una pérdida de producción de más del 5% en comparación con el máximo potencial. Una justificación para usar la relación de densidad óptima como guía es mejorar el potencial productivo por parte de los árboles dominantes después de la eliminación de los individuos subdominantes, otra justificación más importante es desarrollar relaciones de densidad empírica que permitan estimaciones concretas de las pérdidas de producción debidas a los bajos niveles de densidad que existen en algunos rodales en los bosques de Durango.

JUSTIFICACIÓN

Según Picard et al. (2010), la agrupación de especies contribuye a una mejor comprensión del funcionamiento de un ecosistema rico en especies. La integración de especies a grupos bien definidos puede también facilitar la modelización de la dinámica de estos ecosistemas, porque una alta diversidad de especies suele estar asociada con la escasez de datos para ciertas especies de distribución limitada que impide el desarrollo de modelos que requieren suficientes datos para el ajuste.

La agrupación de especies arbóreas también tiene implicaciones prácticas importantes. Los ecosistemas forestales con múltiples especies se cosechan selectivamente en diferentes regiones del mundo (Haight, 1987; Ammer et al., 2011; Shütz et al., 2012). Menos conocida es la extensa aplicación de la cosecha selectiva en los bosques comunitarios de la Sierra Madre Occidental (Pérez-Verdín et al., 2009). Esta observación proporciona una motivación cada vez mayor para evaluar la pertinencia de una silvicultura selectiva por grupos en estos ecosistemas forestales. Un objetivo particularmente desafiante de la silvicultura de los sistemas de cubierta forestal continua es obtener beneficios económicos sin modificar las características claves (incluido el valor de los recursos) del ecosistema natural. En consecuencia, cualquier simplificación significativa de una comunidad forestal compleja puede contribuir significativamente a mejorar la silvicultura y controlar más eficazmente las actividades de aprovechamiento. Una cuestión importante es la ventaja de poder definir alternativas de gestión por grupos de especies y tamaños para basar el control de la cosecha en dichos grupos. Un enfoque basado en las especies es más eficaz desde el punto de vista de la conservación que el método de control de cosecha de Liucort (Swiss Plenterwald retention method) utilizado actualmente en el área de estudio, y que fue desarrollado en Suiza, ya que se basa solamente en los diámetros de los árboles, sin considerar, la distribución y abundancia de las especies.

Por otra parte, la determinación de los niveles adecuados de densidad para una masa forestal en una situación determinada es un proceso complejo que depende de factores biológicos, tecnológicos, económicos y operacionales. Desde un punto de vista de producción, las alternativas de densidad que se pueden plantear para una especie y situación determinada pasan por el máximo aprovechamiento de los recursos de la estación. Sin embargo, este máximo aprovechamiento se puede lograr con un abanico razonablemente amplio de densidades que contempla unos límites superior e inferior que no conviene sobrepasar. El límite superior es la densidad máxima que puede mantener la estación de modo que todos sus recursos son aprovechados por la masa aunque cada árbol sólo obtiene lo imprescindible para sobrevivir sin que exista mortalidad natural. Esta situación extrema se corresponde con la definición clásica de “monte normal”, en el que se consigue la máxima producción en biomasa (aunque, evidentemente, los productos obtenidos son de muy baja calidad). Mientras que el límite inferior es la densidad mínima que puede mantener la estación para que todos los recursos de la misma sean utilizados por la masa, de manera que cada uno de los árboles que la constituyen asimila todo lo que su condición genética y edad le permite, es decir, se desarrollan al máximo de su capacidad de crecimiento. Por debajo de esta densidad mínima los recursos de la estación no son aprovechados en su totalidad y, por tanto, se pierde parte de su potencial productivo.

Así, la identificación de los niveles de densidad residual sugeridos para la región forestal de El Salto, permitirán lograr este máximo aprovechamiento del sitio, lo cual puede traducirse en un incremento muy importante en la producción forestal de sus bosques, trayendo consigo beneficios ambientales, sociales y económicos para sus habitantes.

HIPÓTESIS

La agrupación de especies permite realizar una caracterización adecuada de diferentes grupos de especies en términos de su dominancia en el dosel en los ecosistemas forestales ricos en especies, y representa una forma viable para simplificar los métodos de control para el aprovechamiento selectivo de los bosques de la región forestal de El Salto, Dgo.

El área basal residual de los bosques mixtos e irregulares de la región forestal de El Salto, Dgo., se encuentra significativamente relacionada con el crecimiento en volumen, y por tanto, la definición de niveles sugeridos de área basal representa una alternativa para el incremento de la producción forestal

OBJETIVO GENERAL

Desarrollo de nuevas alternativas silvícolas para el aprovechamiento sustentable de los bosques mixtos e irregulares en el estado Durango.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollo de un método sistemático de agrupación de especies arbóreas en los bosques comunitarios de la Sierra Madre Occidental, basado en datos de sitios permanentes de observación.
- Definir umbrales de área basal residual teóricos por clase de diámetro que permitan un crecimiento óptimo de especies de interés comercial en los bosques mixtos e irregulares de Durango.
- Proponer esquemas de manejo forestal basados en el área basal residual, que garanticen el aprovechamiento sostenido de los recursos forestales.

***CAPÍTULO I. AGRUPACIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN LA
SIERRA MADRE OCCIDENTAL EN DURANGO, MÉXICO.***

AGRUPACIÓN DE ESPECIES FORESTALES EN LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL EN DURANGO, MÉXICO.

RESUMEN

La Sierra Madre Occidental en el estado mexicano de Durango, es hogar de cerca de 5 millones de hectáreas de ecosistemas forestales ricos en especies maderables. Muchas personas viven en o cerca de estos bosques y dependen de ellos para su sustento. La preservación de la riqueza de especies de este recurso único, requiere una mejor comprensión del funcionamiento individual de las especies, un modelo efectivo de manejo y de métodos avanzados de monitoreo. La identificación de similitudes y diferencias entre especies arbóreas individuales es clave para alcanzar estos objetivos. En consecuencia, el propósito de este estudio fue definir grupos de especies basadas en datos de una extensa red de estudios de observación forestal permanente en el estado de Durango. Se revisaron diferentes enfoques para la simplificación de estas comunidades forestales ricas en especies. Una simple ordenación de crecimiento en altura que se había utilizado en varios estudios previos, proporcionó la motivación para el desarrollo de un nuevo método de agrupación de especies. El nuevo enfoque se basa en la diferenciación entre especies de dosel arbóreo alto y especies permanentes de dosel arbóreo bajo. El grupo de dosel arbóreo alto se subdividió después en individuos maduros e inmaduros, utilizando la relación entre diámetros y alturas generada mediante una distribución normal mixta y bivariada. La principal contribución de este trabajo es el uso de un método específico de estratificación vertical a partir de cocientes de altura-diámetro y de grupos bivariados. Esto, de acuerdo a nuestro conocimiento, es nuevo y potencialmente importante para el desarrollo de nuevos métodos de control de la cosecha en los bosques de la Sierra Madre Occidental, y quizás también en otros bosques con múltiples especies que están sujetos al manejo.

Palabras clave: Mexico; estudio observacional; *Pinus*; *Quercus*; Durango; Clasificación.

ABSTRACT

The Sierra Madre Occidental in the Mexican State of Durango, is home to about five million ha of species-rich forest ecosystems. Many people live in or near these forests and depend on them for their livelihood. The preservation of the species richness of this unique resource requires improved understanding of individual species functioning, effective modeling and advanced methods of monitoring. Identifying similarities and differences between individual tree species is a key to achieving these aims. Accordingly, the purpose of this study is to define species cohorts based on Durango's extensive network of permanent observational studies. We review different approaches of simplifying species-rich forest communities. A simple height-growth ordination, that had been used in several previous studies, provided the motivation for an improved new method of species grouping. The new approach is based on the differentiation between canopy species and permanent sub-canopy species. The canopy group is further subdivided into mature and immature individuals using the relationship between diameters and heights within a bivariate mixed normal distribution. The main contribution of this work is the specific approach of vertical stratification based on height/diameter ratios and bivariate clusters. This, to our knowledge, is new and potentially important for developing more advanced methods of harvest control in the forests of the Sierra Madre Occidental, and perhaps also in other multi-species forests that are subject to management.

Key words: México; observational studies; *Pinus*; *Quercus*; Durango; Classification.

INTRODUCCIÓN

La Sierra Madre Occidental en el estado de Durango, México, es el hogar de aproximadamente 5 millones de hectáreas de bosques ricos en especies maderables. En Durango se sabe que existe una gran variedad de especies arbóreas de coníferas y latifoliadas, entre las que se encuentran 20 especies de pino y 43 de encino (González et al., 2007). Más del 85 por ciento del área forestal de Durango es propiedad de comunidades rurales conocidas como ejidos y comunidades que manejan sus tierras con cierto nivel de control gubernamental (Corral-Rivas, 2006). En este contexto, "control gubernamental" significa que los ejidos tienen que practicar el manejo forestal de acuerdo con las leyes federales, principalmente a la "Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006", la cual establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas de México (Thoms y Betters, 1998; SEMARNAT, 2008). Muchas personas viven en o cerca de estas áreas boscosas y dependen de ellas para su sustento. Estos recursos naturales son muy importantes, no sólo por razones socioeconómicas, sino también por la continua existencia de este recurso único.

Durante el siglo pasado, los bosques ricos en especies de la Sierra Madre Occidental han sido objeto de diversas formas de cortas selectiva por las comunidades locales. Con algunas excepciones donde las áreas han sido sujetas a cortas de matarrasa o manejadas con cortas de protección con la finalidad de la formación de bosques comerciales puros y coetáneos, la mayoría de las comunidades de especies naturales han sobrevivido hasta el día de hoy (Corral-Rivas et al., 2012). La existencia a gran escala de ecosistemas forestales naturales de los cuales dependen las comunidades locales para su sustento, presenta un desafío particular para los investigadores que estudian la respuesta del ecosistema al uso humano. Un elemento básico de tales estudios es la simplificación de comunidades arbóreas complejas agrupando especies por algún tipo de atributo común.

¿Por qué simplificar una comunidad forestal?

La cosecha forestal selectiva modifica espacios de crecimiento y los nichos espaciales de las especies maderables. El manejo forestal influye en el tamaño del árbol y en la distribución de la especies y en la mezcla espacial de tamaños y especies arbóreas, causando así cambios importantes en la estructura forestal (GADOW et al., 2011). Un objetivo particularmente desafiante de la silvicultura de los sistemas de cubierta forestal continua es obtener beneficios económicos sin modificar las características claves (incluido el valor de los recursos) del ecosistema natural. En consecuencia, cualquier simplificación significativa de una comunidad forestal compleja puede contribuir significativamente a mejorar la silvicultura y controlar más eficazmente las actividades de aprovechamiento.

Métodos de agrupación de especies arbóreas

Numerosas especies arbóreas coexisten en los bosques de la Sierra Madre Occidental (González et al., 2007). Algunas especies se han adaptado a condiciones específicas del sitio y son capaces de responder a una serie de interacciones complejas para mejorar sus posibilidades de supervivencia y reproducción. Algunas especies producen madera valiosa y otras son de rápido crecimiento. Algunas especies son tolerantes a la sombra, otras exigen estar en la luz. La mayoría de las especies arbóreas, cuando están maduras, ocupan estratos verticales específicos, y algunas ocurren dentro de hábitats particulares. En consecuencia, la adición de especies para formar grupos relativamente homogéneos puede basarse en diferentes métodos y criterios.

Se han publicado numerosos estudios que tratan de la relación entre hábitat y composición de especies. Algunas especies se encontraron distribuidas aleatoriamente, mientras que otras ocurrieron en un patrón agrupado a diferentes escalas (HUBBELL y FOSTER, 1983; DALLING et al., 2007; ZHANG et al., 2009a,b), o en preferencias por atributos específicos de suelo (PALMER, 1990). Estos estudios demuestran que la agrupación de especies por hábitat no es muy efectiva porque, incluso en parcelas muy grandes, se ha encontrado que la

topografía determina el rango geográfico de una especie con menos frecuencia que los factores de pequeña escala como la dispersión y el reclutamiento de claros en el bosque (PLOTKIN et al., 2000). Además, un ambiente rico en especies puede apoyar a un gran número de especies que pueden ocurrir en diferentes hábitats, por lo que la agrupación por hábitat no es muy significativa.

Clasificar las especies en grupos es una manera de entender el funcionamiento de los ecosistemas ricos en especies, y se han utilizado técnicas estadísticas específicas para ello. VANCLAY et al. (1997) presentaron un enfoque de atributos funcionales de las plantas. PICARD et al. (2012) utilizaron análisis de correspondencia múltiple para identificar asociaciones entre diferentes clasificaciones para establecer si diferentes técnicas producen clasificaciones consistentes en un bosque lluvioso tropical en la Guayana Francesa. Encontraron un consenso sobre el tamaño potencial de los árboles, pero no se encontró consenso para la tasa de crecimiento, ni la densidad de madera, rasgos que están correlacionados con el requerimiento de luz.

Un método popular de agrupación de especies es la ordenación de las mismas de acuerdo con su tamaño del crecimiento. Las características utilizadas por Favrichon (1994) para la agrupación de especies fueron el diámetro promedio y el incremento en diámetro por clase de tamaño. ALDER et al. (2002) presentaron un estudio que incluía la ordenación del incremento medio de la especie (I_d) en el percentil 95% de la distribución del diámetro (D_{95}), utilizando un análisis cluster basado en la distancia euclidiana entre puntos. Compararon las tasas de crecimiento y el tamaño típico de 204 especies arbóreas en parcelas de muestreo permanente en Brasil, Costa Rica, Guayana y Papua Nueva Guinea. Su algoritmo de agrupamiento produjo 16 centroides. Se asumió que las tasas de crecimiento bajas asociadas con cinco de los 16 grupos eran indicadores de especies tolerantes a la sombra, con densidades altas de la madera y típicamente ocurrían en una posición inferior de dosel o sotobosque. Otros grupos de especies presentaron un mayor incremento, demandan luz y su madera es de menor densidad. ALDER et al. (2002) asignaron nombres a grupos específicos, como

"pioneros", "emergentes" o de "de dosel intermedio"(ver también ALDER y SILVA, 2000).

El enfoque puramente taxonómico para la agrupación de especies no parece mostrar muy buenos resultados. Incluso en la Sierra Madre Occidental, con dos géneros dominantes *Pinus* (16 especies) y *Quercus* (27 especies), los rasgos de las especies que pueden explicar las diferencias en la estrategia ecológica, varían ampliamente. Cornelissen y Cornwell (2014), por lo tanto, proponen que los efectos de las especies vegetales en las funciones de los ecosistemas se asignen al modelo evolutivo de las especies analizando sus características y filogenias juntas, vinculando así la información ecológica y evolutiva. Los avances recientes en la evaluación de especies de plantas para los rasgos que apoyan estas funciones combinadas con el cribado genético y la bioinformática podrían ser la base para desarrollar filogenias de plantas moleculares que podrían ser utilizados para desarrollar diferentes grupos de especies para ecosistemas particulares. Ese enfoque taxonómico avanzado para la agrupación de las especies parece ser adecuado para el desarrollo de futuros estudios.

Un quinto enfoque implica la agrupación de especies basada en estratos verticales. Por ejemplo, Bossel y Krieger (1994) clasificaron las especies como árboles de sotobosque, árboles maduros de dosel, emergentes y pioneras. En un enfoque de dos etapas Köhler et al. (2000) clasificaron las especies primero por su altura potencial, y después por estado sucesional. El enfoque de "estrato vertical" parece tener sentido. Todas las especies de la Sierra Madre Occidental ocupan uno de los dos estratos verticales como individuo maduro: el dosel arbóreo (*dosel*) y el estrato intermedio (*subdosel*). El problema a resolver es entonces diferenciar entre las especies con árboles inmaduros y las especies de dosel con árboles maduros para obtener tres grupos a los cuales todas las especies pueden ser asignadas.

Finalmente, una clasificación de especies basada en el potencial de utilización es útil cuando los ecosistemas representan un recurso comercialmente importante. Se necesitan la creación de categorías de especies comerciales

asociadas entre sí para asegurar su cosecha sostenible y evitar su agotamiento, en los ecosistemas ricos manejados a través de silvicultura selectiva.

El objetivo de este estudio es desarrollar un método sistemático de agrupación de especies arbóreas en los bosques comunitarios de la Sierra Madre Occidental, basado en datos de 426 sitios permanentes de observación con árboles mapeados y mediciones detalladas. Presentamos un nuevo enfoque de clasificación de especies, basado en la agrupación de individuos como especies de dosel arbóreo y de subdosel, las primeras denominadas árboles maduros y las segundas denominadas árboles inmaduros. El estudio contribuirá a mejorar la comprensión del funcionamiento de este ecosistema rico en especies y, al mismo tiempo, proporcionará una base más sólida para su uso sostenible.

MATERIAL Y MÉTODOS

Datos

Este estudio se basa en una red de sitios de observación permanente establecidos entre 2007 y 2011, y con el primer conjunto se cuenta con remediciones tomadas entre 2013 y 2014. Los sitios son de forma cuadrada y cubren un área de 50x50 m. Se distribuyen sistemáticamente (con algunas excepciones), con una cuadrícula variable que varía de 3 a 5 kilómetros, dependiendo del tamaño de las áreas forestales de propiedad comunitaria (conocidas como ejidos y comunidades en México). La colección de datos de campo se realizó de acuerdo con las metodologías desarrolladas por Corral-Rivas et al. (2009; 2012). Entre otras variables, se registró el número de etiqueta, el código de las especies, el diámetro de la altura del pecho (d , cm), la altura total del árbol (h , m), la altura de la copa viva (m), el azimut ($^{\circ}$) y el radio (m) del centro de la parcela de todos los árboles iguales o mayores de 7.5 cm. A finales del año 2014, la base de datos incluyó tales mediciones para 68,252 árboles. En total 94 de las 426 parcelas fueron remedidas, y los datos de incremento en diámetro y

altura están disponibles para 14,397 árboles. Los valores máximos y mínimos de las variables indican que la red observacional representa adecuadamente la variabilidad de los bosques de la Sierra Madre Occidental.

Estratificación vertical para definir grupos de especies

Algunas especies arbóreas alcanzan el dosel alto cuando están maduras, mientras que otras se han adaptado para permanecer en subdosel incluso cuando llegan a la madurez. Algunas de ellas llegar a formar un dosel arbustivo. Aunque esta agrupación parece estar basada en gran medida en la experiencia de los forestales, es sin embargo un enfoque lógico que ha sido seguido por un número de autores (Bossel y Krieger, 1994; Favrichon, 1994; Köhler y Huth, 1998; Alder et al., 2002). Para ser objetiva, la agrupación debe basarse en criterios bien definidos y en mediciones de campo, siendo las alturas de los árboles obviamente más apropiadas que los diámetros.

Especies de dosel: individuos maduros

En este estudio, definimos especies de dosel como aquellas que eventualmente ocupan el estrato superior. Para identificar a los miembros de este grupo, se estudiaron todos los árboles de los 426 sitios, siguiendo dos enfoques. Se debieron cumplir las dos condiciones siguientes para que una especie califique como especie de dosel:

a) una especie se clasifica como especie de dosel si se encuentra un individuo que ha alcanzado la altura del percentil 95 (21.8 m) de la distribución de la altura total de todos los árboles de la base de datos.

b) además, se evalúan todos los sitios que incluyan al menos un árbol con una altura de 20 m o más. Una especie se clasifica como especie de dosel si se encuentra un individuo que ha alcanzado una altura de al menos 80 por ciento de la altura máxima de uno esos sitios. En casos excepcionales, una especie puede alcanzar la altura del percentil 95, pero solamente en los mejores sitios

donde todavía es una especie de subdosel. Esta condición asegura que un árbol califique como especie de dosel si es dominante dentro de su ambiente local.

El problema se puede resolver utilizando una base de datos extensa con un amplio rango de clases de sitio. Un poco más difícil es la tarea de distinguir entre las especies de dosel maduras e inmaduras, aquellas que ya han alcanzado el dosel, y las que aún existen debajo de éste.

Especies de dosel: individuos inmaduros

La población de especies de dosel está formada por individuos maduros e inmaduros. El problema es encontrar una manera objetiva y plausible de distinguir entre estos dos grupos. Estudios previos en bosques naturales ricos en especies en Europa y China han demostrado que las proporciones del ratio altura y diámetro de las especies maduras e inmaduras de dosel son diferentes (Zucchini et al., 2001; Zhang et al., 2014). Estos ratios tienden a ser más bajos en los árboles que ya han alcanzado el dosel y más altos en aquellos individuos que todavía crecen en el subdosel. Los parámetros del modelo bivariado y combinado utilizado para distinguir entre los dos grupos, tienen interpretaciones familiares y pueden ser estimados usando la función *mclust* del programa R (Fraley et al., 2012). Suponga que $f(d, h)$ denota la función de densidad de probabilidad bivariada de diámetro y altura. El modelo propuesto es entonces:

$$f(d, h) = \alpha \cdot n_1(d, h) + (1 - \alpha) \cdot n_2(d, h)$$

donde α , un parámetro en el intervalo (0,1), el cual determina la proporción de árboles pertenecientes a cada una de las dos distribuciones normales y bivariadas de componentes $n_1(d, h)$ y $n_2(d, h)$. Los parámetros de $n_j(d, h)$ son las expectativas u_{dj} , u_{hj} ; las varianzas σ^2_{dj} y σ^2_{hj} , y los coeficientes de correlación, ρ_j ($j=1,2$). El diámetro que separa los dos grupos se puede utilizar para distinguir entre los individuos maduros e inmaduros. Ese "diámetro de segregación" es característico de las especies y tiene que ser identificado usando la base de datos disponible.

Especies de subdosel

Debajo del dosel hay otra capa de vegetación, llamada subdosel o sotobosque. Esta capa está formada por plantas leñosas de poca altura, a veces con múltiples tallos desde la base, que alcanzan una altura de madurez que a menudo es considerablemente menor que la altura del dosel. En el presente estudio, definimos especies de subdosel o sotobosque como todas aquellas que no se identifican como especies de dosel.

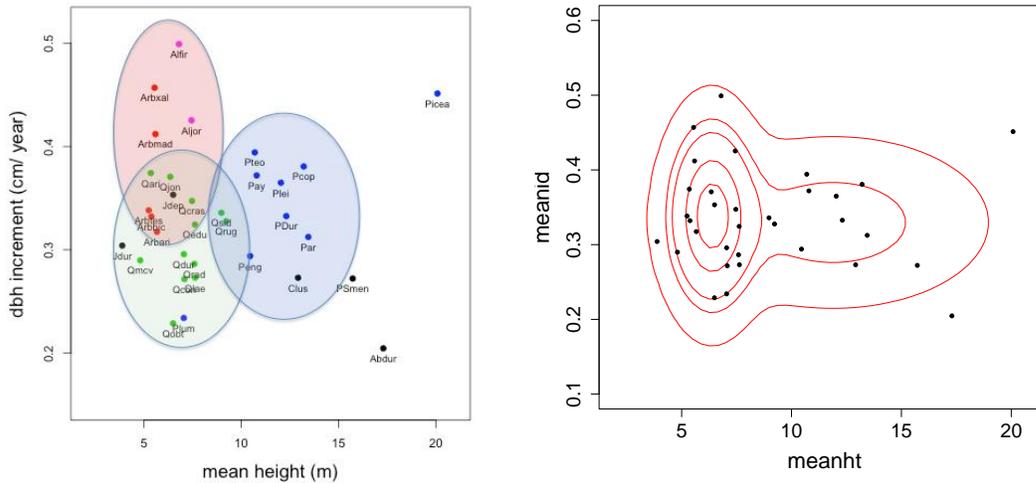
RESULTADOS

Ordenación de la magnitud del crecimiento

La Figura 1 muestra las tasas de crecimiento medio en diámetro normal (*dap*) dibujadas sobre las alturas promedio de los árboles de todas las especies para las cuales se dispone de al menos 20 mediciones en el conjunto de 14,397 árboles con mediciones disponibles. En total se consideraron 33 especies arbóreas:

Abies durangensis (Abdur); *Alnus firmifolia* (Alfir); *Alnus jorullensis* (Aljor); *Arbutus arizonica* (Arbari); *Arbutus bicolor* (Arbbic); *Arbutus madrensis* (Arbmad); *Arbutus tessellata* (Arbtes); *Arbutus xalapensis* (Arbxal); *Cupressus lusitanica* (Clus); *Juniperus deppeana* (Jdep); *Juniperus durangensis* (Jdur); *Picea chihuahuana* (Picea); *Pinus arizonica* (Par); *Pinus strobiformis* (Pay); *Pinus cooperi* (Pcop); *Pinus durangensis* (Pdur); *Pinus engelmannii* (Pen); *Pinus leiophylla* (Plei); *Pinus lumholtzii* (Plum); *Pinus teocote* (Pteo); *Pseudotsuga menziesii* (PSmen); *Quercus arizonica* (Qari); *Quercus conzattii* (Qcon); *Quercus crassifolia* (Qcras); *Quercus durifolia* (Qdur); *Quercus eduardii* (Qed); *Quercus jonesii* (Qjon); *Quercus laeta* (Qlac); *Quercus mcvaughii* (Qmcv); *Quercus obtusata* (Qob); *Quercus radiata* (Qrad); *Quercus rugosa* (Qrug); *Quercus sideroxylla* (Qsid).

La Figura 1 (a) presenta la ordenación del crecimiento en diámetro y en altura de las 33 especies. El símbolo abreviado que aparece dentro de paréntesis siguiendo el nombre de la especie, se introduce para facilitar la identificación de especies individuales. Las tres elipses sombreadas se utilizan para presentar una primera impresión general de las agrupaciones.



(a) Tres clusters o grupos

(b) dos estratos verticales

Figura 1. Ordenación del crecimiento en diámetro de 33 especies para las cuales se dispone de al menos 20 remediciones.

El área sombreada en la parte inferior izquierda de la Fig. 1 (a) incluye las 12 especies de *Quercus*, la elipse superior incluye 5 especies de madroño y dos especies de *Alnus*, mientras que las 8 especies de *Pinus* se encuentran en la zona con alturas medias entre 10 y 15 m. La Fig. 1 (b) muestra los resultados del análisis cluster realizado a los datos. El gráfico presenta una estructura vertical con dos estratos bien definidos, un estrato inferior con una amplia gama de tasas de crecimiento de diámetro (0.2-0.5 cm/año) y un estrato superior con un rango más estrecho de crecimiento en *dap* (0.28-0.4 cm/año).

El estrato inferior incluye varias especies de *Arbutus*, *Alnus* y *Quercus* con alturas medias que van de 4 a 8 m. Con alturas medias similares, las especies de *Arbutus* y *Alnus* tienen en promedio tasas de crecimiento en diámetro medias más altas que las del género *Quercus*. El grupo más prominente en el estrato superior, con alturas medias que van de 8-15 m son las 8 especies de *Pinus*. *Abies durangensis*, *Picea Chihuahuana* y *Pseudotsuga menziesii* tienen las alturas medias más grandes. Sin embargo, estas especies sólo se producen en poblaciones aisladas y no son tan representativas de la Sierra Madre Occidental (Aguirre et al., 2003).

Estratificación vertical

Dieciocho, de un total de 64 especies arbóreas registradas en la base de datos, se clasificaron según el inciso (a) descrito en la sección 2.3.1. Dos de estas especies que habían alcanzado la altura del percentil 95 (*Cupressus lusitanica* y *Alnus jorullensis*), fueron posteriormente excluidas porque no habían sido identificadas como dominantes dentro de su entorno local y no cumplieron con los requisitos del inciso (b). De estas 16 especies clasificadas como de dosel arbóreo, 10 son pinos y 4 son encinos, las cuales se presentan en la Tabla 1, mientras que la Figura 2 muestra dos ejemplos del modelo mixto y bivariado que fue ajustado a los datos de campo.

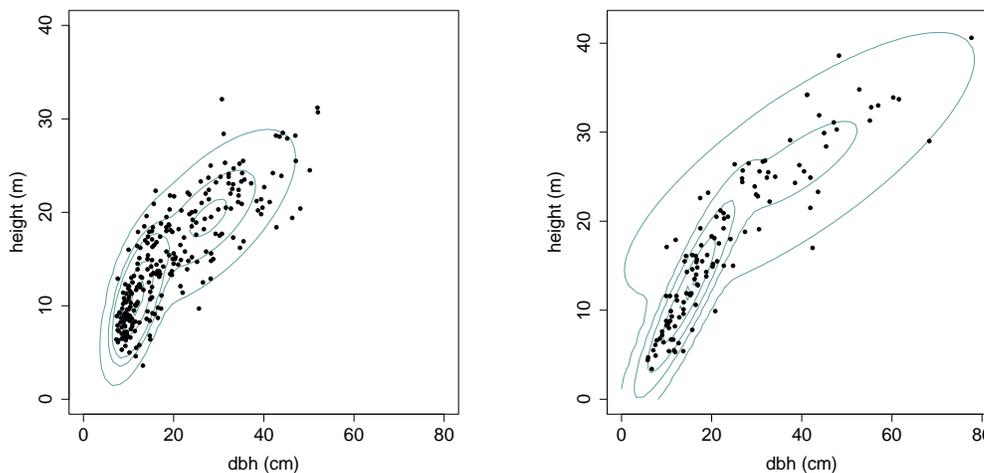


Figura 2. Dos gráficos típicos del modelo mixto y bivariado que fue ajustado sobre los datos para diferenciar entre individuos maduros e inmaduros de las especies de dosel, *Pinus arizonica* (izquierda) y *Pseudotsuga menziesii* (derecha). Las líneas representan los cuantiles (0,05, 0,25, 0,5, 0,75, 0,95) de la densidad bivariada.

Las probabilidades de mezcla dadas en la Tabla1 representan las proporciones de las observaciones en los grupos de especies con árboles maduros e inmaduros. El grupo significa referirse a los diámetros medios de los individuos inmaduros y maduros. El diámetro de segregación es aquel dap (redondeado al cm más cercano) que separa las especies de dosel maduras e inmaduras,

basándose en los parámetros del modelo mixto bivariado. Su valor se muestra por separado para cada especie en la columna 10 de la Tabla 1, redondeada al centímetro.

Los radios dbh/altura de los valores medios del grupo maduro exceden consistentemente de las del grupo inmaduro. Esto parece ser una manera natural de distinguir los dos grupos, aunque los efectos del sitio y de la densidad no fueron considerados en este estudio. El modelo bivariado no muestra un buen ajuste en algunas especies con pocas observaciones, y por tanto se requiere de más estudios para identificar mejores métodos de agrupamiento. El objetivo principal del presente estudio fue identificar un parámetro que separe los dos grupos.

Las 16 especies de dosel arbóreo que han cumplido los requisitos de la condición (b) descritas en los subíndices "1" y "2" de las columnas se refieren a los grupos inmaduros y maduros, respectivamente. El dap de segregación es el dap que separa a los individuos maduros e inmaduros de la especie de dosel, basándose en los resultados del modelo de mezcla bivariado.

Tabla 1. Se muestran las 16 especies del dosel arbóreo.

Especie	P ₁	P ₂	d ₁	h ₁	d ₂	h ₂	vard ₁	vard ₂	segrd	BIC	ICL
<i>Picea chihuahuana</i> (25)	0.30	0.70	12.0	8.0	53.7	27.8	27.6	564.8	33	-374.5318	-375.5221
<i>Pinus arizonica</i> (265)	0.51	0.49	11.7	10.6	27.8	19.4	8.9	95.9	20	-3206.53	-3256.06
<i>Pinus ayacahuite</i> (930)	0.55	0.45	12.1	9.2	23.2	15.3	8.2	73.8	18	-10461.21	-10683.93
<i>Pinus cooperi</i> (2091)	0.56	0.44	13.4	10.5	28.4	18.2	15.2	114.9	21	-25615.88	-26099.24
<i>Pinus durangensis</i> (5578)	0.50	0.50	11.6	10.1	25.2	18.0	7.2	101.6	18	-66626.24	-67786.94
<i>Pinus engelmannii</i> (89)	0.84	0.16	16.7	10.1	38.6	19.7	27.9	183.9	28	-1051.21	-1058.99
<i>Pinus leiophylla</i> (313)	0.50	0.50	13.4	10.0	27.1	17.1	13.4	66.3	20	-3804.406	-3879.67
<i>Pinus lumholtzii</i> (352)	0.55	0.45	10.9	5.9	18.8	10.0	10.5	34.3	15	-3667.733	-3755.939
<i>Pinus teocote</i> (1870)	0.63	0.37	12.7	9.5	26.2	16.5	11.9	113.1	19	-21589.24	-21989.61
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (122)	0.59	0.41	14.85	12.1	39.5	26.7	29.2	328.7	27	-1654.36	-1671.46
<i>Quercus crassifolia</i> (23)	0.82	0.18	15.1	7.9	37.2	16.7	25.6	216.6	26	-2025.89	-2042.78
<i>Quercus</i>	0.56	0.44	10.3	6.3	18.8	8.8	1.6	17.6	15	-310.35	-312.66

Especie	P ₁	P ₂	d ₁	h ₁	d ₂	h ₂	vard ₁	vard ₂	segrd	BIC	ICL
<i>durifolia</i> (29)											
<i>Quercus rugosa</i> (93)	0.62	0.38	12.7	8.8	29.8	14.2	12.0	246.4	21	-1126.97	-1138.63
<i>Quercus sideroxylla</i> (2756)	0.70	0.30	13.2	8.6	30.3	14.4	14.3	199.2	22	32024.46	32536.52

P₁, P₂= probabilidades de mezcla; d₁, d₂=diámetro medio de los grupos 1 y 2; h₁, h₂= altura media de los grupos 1 y 2; vard₁, vard₂= varianza del dap de los grupos 1 y 2; BIC= Criterio de Información Bayesiano (Schwarz, 1978); ICL (Criterio Integral de Probabilidad Completa) (Biernacki et al., 2000). El número de árboles se da entre paréntesis después del nombre de la especie. segrd es la estimación del diámetro de segregación, redondeado al centímetro más cercano que separa a los dos grupos.

Picea chihuahuana es una especie rara que ocurre en poblaciones pequeñas aisladas, y las observaciones disponibles son insuficientes para separar los dos grupos. Lo mismo se aplica a algunas de las especies de encinos. Sin embargo, proporcionamos estimaciones iniciales basadas en las observaciones disponibles.

Especie de subdosel o sotobosque permanente

Se encontró que las siguientes especies fueron identificadas como especies de subdosel o de sotobosque permanente en los 429 sitios de observación forestal:

Alnus firmifolia; *Arbutus arizonica*; *Arbutus bicolor*; *Arbutus bicolor*; *Arbutus madrensis*; *Arbutus tessellata*; *Arbutus xalapensis*; *Crataegus spp*; *Cupressus arizonica*; *Fraxinus trifoliata*; *Guazuma ulmifolia*; *Juniperus deppeana*; *Juniperus durangensis*; *Juniperus flaccida*; *Juniperus monosperma*; *Pinus cembroides*; *Pinus devoniana*; *Pinus douglasiana*; *Pinus herrerae*; *Pinus michoacana*; *Pinus tenuifolia*; *Populus tremuloides*; *Prunus serotina*; *Quercus arizonica*; *Quercus candicans*; *Quercus coccolobifolia*; *Quercus conzattii*; *Quercus depressipes*; *Quercus eduardii*; *Quercus emoryi*; *Quercus fulva*; *Quercus gentryi*; *Quercus hypoleuroides*; *Quercus jonesii*; *Quercus laeta*; *Quercus grisea*; *Quercus laurina*; *Quercus mcvaughii*; *Quercus obtusata*; *Quercus radiata*; *Quercus resinosa*; *Quercus rugosa*; *Quercus tarahumara*; *Quercus urbanii*; y *Quercus viminea*.

La mayoría de estas especies no tiene importancia económica. Curiosamente, la base de datos muestra que la gestión selectiva practicada en la Sierra Madre Occidental no ha provocado un cambio importante en la riqueza de las especies nativas.

DISCUSIÓN

Simplificando ecosistemas ricos en especies

La estructura y el funcionamiento de los ecosistemas ricos en especies, como los bosques de la Sierra Madre Occidental, pueden entenderse mejor cuando se identifican ciertas características que son compartidas por algunas especies. Una alta diversidad de especies suele estar asociada con la escasez de datos para ciertas especies raras que limitan el desarrollo de modelos que requieren datos suficientes para su ajuste. Por lo tanto, la agrupación de especies arbóreas en grupos bien definidos puede facilitar la modelización de la dinámica de dichos ecosistemas. Además, la agrupación de especies arbóreas parece ser aún más importante desde el punto de vista de su utilización. Los ecosistemas forestales con múltiples especies se cosechan selectivamente en diferentes regiones del mundo. La preservación de la riqueza de las especies en dichos ecosistemas suele facilitarse cuando se agrupan las especies.

Basándose en las mediciones de campo y en los métodos descritos en la sección 2, todos los árboles que pertenezcan a un estrato vertical concreto se asignarán a uno de los tres grupos posibles. Es posible por supuesto desarrollar clasificaciones más complejas que impliquen criterios adicionales, pero el propósito de este estudio era desarrollar una agrupación inicial robusta con pocos grupos basada en un enfoque estadístico objetivo.

El vínculo entre las características de las plantas y sus funciones

Los bosques multiespecíficos tienden a estar compuestos por diferentes especies arbóreas que prosperan en hábitats particulares y que responden a condiciones ambientales contrastantes debido a su variación genotípica y fenotípica (Adams, 1993). El hábitat se define por ciertas condiciones del sitio y por las constelaciones espaciales específicas y las relaciones físicas entre grupos de individuos vecinos. Algunas especies eventualmente alcanzan el dosel como individuos dominantes mientras que otras nunca lo hacen. Tales simplificaciones

pueden ser muy útiles porque algunos estudios han mostrado cómo las características de los árboles afectan el desempeño de las especies de manera individual, sin embargo aún se carece de la capacidad de predecir el ensamble de la comunidad a partir de estas relaciones (Lebrija-Trejos et al., 2010).

Esto se debe en parte al hecho de que el vínculo entre las características de las plantas y su función en el medio ambiente solo se conceptualiza principalmente y solo pocos estudios los correlacionan directamente (McGill et al., 2006, Vile et al., 2006). La importancia de los rasgos de las especies difiere con las condiciones del ecosistema y la escala de estudio, la cual añade otra dimensión (Wright et al., 2005, Ackerly y Cornwell, 2007). Lebrija-Trejos et al. (2010) modelaron el agrupamiento de comunidades a través de la temperatura del aire, mientras que la altura máxima, la cual es importante para como elemento competitivo de algunas especie en muchos sistemas (Thomas 1996, Westoby et al. 2002, Poorter et al. 2006), resultó ser irrelevante para la sucesión en una comunidad tropical de bosque seco.

Preservación de la riqueza de especies y la diversidad de tamaños en ecosistemas manejados

Este estudio se realizó gracias a la disponibilidad de datos de una extensa red de parcelas permanentes de observación forestal con árboles mapeados, y con una amplia cobertura geográfica y mediciones repetidas. En consecuencia, ha sido sencillo clasificar ciertas especies como especies de dosel y otras como especies del sub dosel o de sotobosque a través de la base de datos y evaluando las alturas de los árboles en relación la altura máxima encontrada en cada sitio. Encontrar una distinción adecuada entre árboles maduros e inmaduros de dosel ha sido algo más desafiante. Eventualmente, el uso del modelo mixto y bivariado resultó ser adecuado para estimar un dap, por separado para cada especie, que segrega los grupos de especies de dosel maduras e inmaduras. La agrupación básica presentada en este estudio puede ampliarse para incluir otros rasgos específicos (crecimiento de los árboles relacionados con el sitio y la

competencia), combinaciones de características (altura y crecimiento del árbol) o criterios económicos (valor de la madera). Como se establece en la sección 1.1, cualquier simplificación significativa de una comunidad forestal compleja puede contribuir significativamente a la mejora de la silvicultura y al control más efectivo de las actividades de cosecha. El propósito de la agrupación de especies no sólo es mejorar su modelación, sino principalmente servir de base para nuevos sistemas de manejo que sean más efectivos que el enfoque de la J-invertida de Lioucort desarrollada en Suiza. La segregación del dap se puede especificar de diferentes maneras. Por ejemplo, se puede clasificar los árboles no sólo basándose en su estatus dentro de la comunidad (como lo hemos hecho en este estudio), sino también según las clases de tamaño que son comercialmente significativas, la diferencia entre individuos "maduros" e "inmaduros" según demanda del mercado para ciertas dimensiones de destinos comerciales. Se requiere de investigaciones adicionales para evaluar si la agrupación necesita ser extendida para incluir los valores de madera de diferentes dimensiones. Gran parte de los ecosistemas de la Sierra Madre Occidental se utiliza para la producción maderera y el potencial económico de las diferentes especies arbóreas es un importante criterio para su gestión. Por ejemplo, el dap óptimo del pino y el encino del grupo 1 seleccionados para la cosecha es 35 y 40 cm, respectivamente, mientras que los precios por m³ fluctúan entre 80 US\$ y 100 US\$ para la madera de pino y 60 US \$ y 80 US \$ para la madera de encino. Por tanto, se requieren investigaciones adicionales para corroborar esta información.

La importancia ecológica de la actividad humana

Encuestas recientes han demostrado que prácticamente todos los ecosistemas de la tierra son utilizados por el hombre, donde la "utilización" incluye también las pocas áreas restantes manejadas para la conservación (Kareiva et al., 2007). La distinción entre lo natural y el cultivo se ha desenfocado, y una proyección de las tendencias actuales lleva a la conclusión de que la tierra será aún más afectada por el hombre en el futuro. Todos los ecosistemas son utilizados por los seres humanos y existe una creciente preocupación por la relevancia de la

investigación tradicional que se ocupa de los sistemas puramente "naturales" (Leinfelder et al., 2012).

En consecuencia, Crutzen (2002) propuso renombrar el período geológico actual del Holoceno y llamarlo Antropoceno, en el que los seres humanos son una parte integral de la naturaleza, modificando constantemente el planeta. El hombre es parte de la naturaleza, y según Leopold (1949) las actividades humanas no son afortunadamente sólo destructivas, sino también cada vez más constructivas y creativas en el diseño y aprovechamiento sostenible de ecosistemas viables, como es el caso de los bosques únicos de la Sierra Mexicana Madre Occidental. La certificación forestal medida con estándares internacionalmente aceptados se considera cada vez más como requisito necesario en el sector forestal y la preservación de la riqueza de especies se ha convertido en uno de los principios rectores del manejo sustentable de ecosistemas.

Frecuentemente se cree que los bosques de varias especies son superiores a los monocultivos de plantaciones para abordar una amplia gama de expectativas. Por esta razón, existe un interés amplio y creciente en el desarrollo de métodos de manejo para rehabilitar los bosques naturales perturbados, para reconvertir los monocultivos plantados a ecosistemas naturales o en manejar los bosques existentes de varias especies, como en el caso de la Sierra Madre Occidental, más efectivamente. La preservación de la riqueza de especies en estos ecosistemas complejos requiere métodos avanzados de manejo. En consecuencia, Gadow et al. (2013) presentaron nuevas estrategias de retención de especies para los bosques naturales manejados de manera selectiva. Descubrieron que especialmente relevantes son los métodos que no prescriben cuánto cosechar, sino aquellos que especifican la masa residual, en términos de especies y dimensiones arbóreas, la estructura y la diversidad que debe quedar después de la cosecha. Los detalles específicos necesitan ser adaptados para diferentes ecosistemas, y uno de los requisitos básicos parece ser la agrupación de especies en grupos con características similares, como se presenta en este estudio. Esto, de acuerdo con nuestro conocimiento, es nuevo y potencialmente

importante para el desarrollo de métodos más avanzados de control de la cosecha en los bosques de la Sierra Madre Occidental, y tal vez en otros bosques de varias especies que están sujetos a manejo.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el fondo sectorial de CONAFOR-CONACYT (proyecto: 115900), y por acuerdos específicos de colaboración entre la Comisión Nacional Forestal y la Universidad Juárez del Estado de Durango.

REFERENCIAS

- Ackerly, D. D. and W. K. Cornwell (2007): A trait-based approach to community assembly: partitioning of species trait values into within- and among-community components. *Ecology Letters* 10:135–145.
- Adams, M.D. (1993): Genotypic and phenotypic variation as stress adaptations in temperate tree species: a review of several case studies. *Tree Physiology* 14 (7-8-9): 833-842.
- Aguirre O, G.Y. Hui., K. v. Gadow and J. Jimenez (2003): Comparative Analysis of Natural Forest Sites in Durango, Mexico. *For. Ecol. Manage.* 183:137-145.
- Alder, D., Oavika, F., Sanchez, M., Silva, J.N.M., Van Der Hout, P., Wright, H.L., (2002): A comparison of species growth rates from our moist tropical forest regions using increment-size ordination. *Int. For Rev.* 4 (3), 196–205.
- ALDER, D., SILVA, J.N.M. (2000): An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. *For. Ecol. Manage.* 130 (1-3), 141–157.
- Ammer, C., Balandier, P., Bentsen, N.S., Coll, L., Löf, M. (2011): Forest vegetation management under debate: an introduction. *Eur. J. Forest Res.* 130, 1-5.
- Biernacki, C., Celeux, G., and Govaert, G. (2000): Assessing a mixture model for clustering with the integrated completed likelihood. *IEEE Trans. PAMI*, 22:719–725.
- Bossel, H. and Krieger, H. (1994): Simulation of multi-species tropical forest dynamics using a vertically and horizontally structured model. *For. Ecol. Manage.*, 69: 123-144.
- Fraley, C., A. E. Raftery, T. B. Murphy and L. Scrucca (2012): *mclust* Version 4 for R: Normal Mixture Modeling for Model-Based Clustering, Classification, and Density Estimation. Technical Report No. 597, Department of Statistics, University of Washington.
- Cornelissen, J. H. C. and Cornwell, W.K. (2014): The Tree of Life in ecosystems: evolution of plant effects on carbon and nutrient cycling. *Journal of Ecology* 102, 269–274.
- Corral-Rivas, J.J. (2006): Models of tree growth and spatial structure for multi-species, uneven-aged forests in Durango (Mexico). PhD. Thesis. University of Göttingen. 104 p.
- Corral-Rivas J., Vargas B., Wehenkel C., Aguirre O., Álvarez J. and Rojo A. (2009): Guía para el Establecimiento de Sitios de Inventario Periódico Forestal y de Suelos del Estado de Durango. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Juárez del Estado de Durango. 89 p.
- Corral-Rivas J.J. , Reyes R. I., Wehenkel C., Aguirre-Calderón O.A. and Gadow, K. v. (2012): A Network of Forest Observational Studies in Durango (Mexico). In: Zhao XiuHai (赵秀海), Zhang ChunYu (张春雨) and Klaus v. Gadow (ed), 2012: Forest Observational Studies. Proceedings of an International Workshop at Beijing Forestry University, which convened on 20/21 September 2012: 125-138.

- Crutzen, P.J. (2002): Geology of Mankind. *NATURE*, Vol 415: 23.
- Dalling, J.R., J.W., Harms, K.E., Yavitt, J.B., Stallard, R.F., Mirabello, M., Hubbell, S.P., Valencia, R., Navarrete, H., Vallejo, M., Foster, R.B. (2007): Soil nutrients influence spatial distributions of tropical tree species. *PNAS* 104, 864-869.
- Favrillon, V. (1994): Classification des especes arborees en groupes fonctionnels en vue de la realisation d'un modele de dynamique de peuplement en foret guyanaise. *Rev. E´ col. (Terre et Vie)* 49 (4), 379–403.
- Gadow, K. V., Zhang, C.Y., Wehenkel, C., Pommerening, A., Corral-Rivas, J., Korol, M., Myklush, S., Hui, G.Y., Kiviste, A., Zhao, X.H. (2011): Forest Structure and Diversity. In: Pukkala, T. and Gadow, K. v. (eds.): *Continuous Cover Forestry, Book Series Managing Forest Ecosystems Vol 24*, © Springer Science+Business Media B.V.: p. 29-84.
- Gadow, K. V., Zhao XH and Corral Rivas, J.J. (2013): Retention Strategies for Multi-Species Forests. *Proc. International Symposium for the 50th Anniversary of the Forestry Sector Planning in Turkey, 26-28 November 2013, Antalya*.
- González E. M.S., González E., M., Márquez L. M.A. (2007): Vegetación y Ecorregiones de Durango. CIIDIR-IPN. Plaza y Valdés, S.A. de C.V. México, D.F. 219 p.
- Haight, R.G. (1987): Evaluating the Efficiency of Even-Aged and Uneven-Aged Stand Management. *Forest Science*, Volume 33, Number 1, 1 March 1987 , pp. 116-134 (19).
- Hubbell, S. P. and R. B. Foster (1983). Diversity of canopy trees in a Neotropical forest and implications for the conservation of tropical trees. In: Sutton, S.J., Whitmore, T.C. and Chadwick, A.C. (eds.): *Tropical RainForest: Ecology and Management*. Blackwell, Oxford, U.K.: p. 25-41.
- Kareiva, P., Watts, S., McDonald R., Boucher T. (2007): Domesticated Nature: Shaping Landscapes and Ecosystems for Human Welfare. *Science* 316(5833): 1866-1869.
- Köhler, P., Ditzer, T., Huth, A. (2000): Concepts for the aggregation of tropical tree species into functional types and the application to Sabah's lowland rain forests. *J. Trop. Ecol.* 16 (4), 591–602.
- Köhler, P., Huth, A. (1998): The effects of tree species grouping in tropical rainforest modelling: Simulations with the individual-based model Formind. *Ecol. Model.* 109 (3), 301–321.
- Lebrija-Trejos, E., Pérez-García, J. A., Bongers, F. and Poorter, L. (2010): Functional traits and environmental filtering drive community assembly in a species-rich tropical system. *Ecology*, 91(2), 2010, pp. 386–398
- Leinfelder, R., Schwägerl, CH., Möllers, N. U. Trischler, H., (2012): Die menschengemachte Erde - Das Anthropozän sprengt die Grenzen von Natur, Kultur und Technik. *Kultur & Technik* 2/2012 (Themenheft Mensch und Natur), S. 12-17, München (Verlag Deutsches Museum).
- Leopold, Aldo (1949): *A Sand County Almanac, and sketches here and there*. Oxford University Press, Inc., 200 Madison Avenue, New York.

- Mcgill, B. J., B. J. Enquist, E. Weiher, and M. Westoby (2006): Rebuilding community ecology from functional traits. *Trends in Ecology and Evolution* 21:178–185.
- Palmer, M.W. (1990): Spatial scale and patterns of species-environment relationships in hardwood forests of the North Carolina piedmont. *Coenoses* 5, 79-87.
- Pérez-Verdín, G., Hernández-Díaz, J.C., Márquez-Linares, M.A. and Tecle, A. (2009): Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango. *Madera y Bosques* 15, 27-46.
- Picard, N. Frédéric Mortier, Vivien Rossi, Sylvie Gourlet-Fleury (2010): Clustering species using a model of population dynamics and aggregation theory. *Ecological Modelling* 221 (2010) 152–160
- Picard, N., P. Köhler, F. Mortier, and S. Gourlet-Fleury (2012): A comparison of five classifications of species into functional groups in tropical forests of French Guiana. *Ecological Complexity* 11 (2012) 75–83
- Plotkin, J, B., Potts, M.D., Leslie, N., Manokaran, N., Lefrankieb, J. and Ashton, P.S, (2000): Species-area Curves, Spatial Aggregation, and Habitat Specialization in Tropical Forests. *J. Theor. Biol.* 207, 81-99.
- Poorter, L., L. Bongers, and F. Bongers (2006): Architecture of 54 moist-forest tree species: traits, trade-offs, and functional groups. *Ecology* 87:1289–1301.
- Schütz, J.-P., Pukkala, T., Donoso, P. and Gadow, K. v. (2012): Historical Emergence and Current Application of CCF, In: Pukkala T., Gadow K.v. (Eds.), *Continuous Cover Forestry. Book Series Managing Forest Ecosystems*. Springer Science+Business Media B.V., pp. 1-28.
- Schwarz, G. (1978): Estimating the dimension of a model. *Ann. Statist.*, 6:461–464.
- SEMARNAT, (2008): Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006: que establece los lineamientos, criterios y especificaciones de los contenidos de los programas de manejo forestal para el aprovechamiento de recursos forestales maderables en bosques, selvas y vegetación de zonas áridas. Viernes 17 de octubre de 2008, *Diario Oficial, México D.F.*
- Thomas, S. C. (1996): Asymptotic height as a predictor of growth and allometric characteristics in Malaysian rain forest trees. *American Journal of Botany* 83:556–566.
- Thoms, C.A., and D.R. Betters, (1998): The potential for ecosystem management in Mexico's forest ejidos. *Forest Ecology and Management* 103: 149-157.
- Vanclay J.K., Gillison, A.N. and Keenan, R.J. (1997): Using Plant Functional Attributes to quantify site productivity and growth patterns in mixed forests. *Forest Ecology and Management* 94: 149-163.
- Vile, D., B. Shipley, and E. Garnier (2006): A structural equation model to integrate changes in functional strategies during old-field succession. *Ecology* 87:504–517.
- Wehenkel C., Corral-Rivas J.J., Hernández-Díaz J.C., Gadow K. v. (2011): Estimating Balanced Structure Areas in multi-species forests on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Annals of Forest Science* 68: 385–394.

- Westoby, M., D. S. Falster, A. T. Moles, P. A. Vesk, and I. J. Wright (2002): Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33:125–159.
- Wright, I. J., et al. (2005): Assessing the generality of global leaf trait relationships. *New Phytologist* 166:485–496.
- Zalasiewicz, J. et al. (2008): *Are we now living in the Anthropocene?* In: *GSA Today*. Vol. 18, Nr. 2, Februar 2008.
- Zhang C, Zhao X, Gadow, K. v. (2014): Analysing Selective Harvest Events in three large Forest Observational Studies in North Eastern China. *Forest Ecology and Management* 316: 100-109.
- Zhang, CY, Zhao, XH and Gadow, K. v. (2009b): Gender, neighboring competition and habitat effects on the stem growth of dioecious *Fraxinus mandshurica* trees in a northern temperate forest. *Annals of Forest Science* 66: 812-821.
- Zhang, CY, Zhao, XH, Liu, XD. and Gadow, K. v. (2009a): Spatial distributions and spatial associations of dominant tree species in Korean pine broadleaved old-growth forests in Changbai Mountains. *Baltic Forestry* 16 (1): 66-74.
- Zucchini, W., Schmidt, M. & Gadow, K. v. (2001): A model for the diameter-height distribution in an uneven-aged beech forest and a method to assess the fit of such models. *Silva Fennica*. 35 (2): 168-183.

***CAPITULO II. DENSIDAD RESIDUAL SUGERIDA PARA EL
MANEJO FORESTAL SUSTENTABLE DE LOS BOSQUES
NATURALES DE DURANGO, MÉXICO.***

DENSIDAD RESIDUAL SUGERIDA PARA EL MANEJO FORESTAL SUSTENTABLE DE LOS BOSQUES NATURALES DE DURANGO, MÉXICO.

RESUMEN

Los bosques naturales y múltiespecíficos representan más del 90 por ciento de las áreas forestales del mundo y son una fuente de muchos productos y servicios adicionales a la madera. Los bosques de la Sierra Madre Occidental representan un ejemplo destacado, ya que proporcionan más del 50 por ciento del total de madera en rollo en el país. La región forestal de El Salto P.N., ha estado sujeta a la silvicultura selectiva durante más de un siglo para proporcionar una gran variedad de bienes y servicios a las comunidades locales. Existen nuevas evidencias basadas en una serie de estudios permanentes de observación forestal que sugieren que la productividad potencial de estos bosques es alta. Sin embargo, la productividad de estos bosques parece ser muy sensible a la densidad residual, y niveles bajos pueden reducir significativamente la productividad forestal. El objetivo de esta investigación fue definir niveles teóricos de densidad residual que permitan un crecimiento cercano al óptimo para los subrodales comerciales de los bosques de la región de El Salto, Durango. Los resultados de las ganancias potenciales en productividad al mantener los subrodales en niveles sugeridos de densidad residual, ofrecen bases para incrementar la producción forestal de manera significativa en los bosques naturales de la Sierra Madre Occidental.

Palabras claves: Comunidad; Densidad residual; Ejido; Incremento en volumen; Sierra Madre Occidental;

ABSTRACT

The natural and species-rich forests represent more than 90 percent of the forest areas worldwide and are a source of many additional products and services distinct from timber. The forests of the Sierra Madre Occidental represent a prominent example, producing more than 50 percent of the country's timber. The forest region of El Salto Durango has been subject to selective harvesting for more than a century to provide a great variety of goods and services to the local communities. There are new evidences based in a series of permanent observational forest studies that suggest that the potential forest productivity of these forests is high. However, the forest productivity of these forests seems to be very sensitive to the residual density, and low levels can reduce it in a significant way. The goal of this research was to define theoretical levels of residual forest density that produce a growth close to an optimum for commercial subcompartments in the forest of El Salto, Durango. The results of the potential productivity gains, if forest subcompartments reach adequate residual forest density offer bases to increase significantly forest production in the natural forests of the Sierra Madre Occidental.

Key words: Comunidad; Ejido; Residual Forest Density; Sierra Madre Occidental; Volume Increment.

INTRODUCCIÓN

Los bosques del mundo habrán de proveer las necesidades y deseos de otros tres a cuatro mil millones de personas hacia el final de este siglo (Lutz et al., 2001). La población actual ejerce una presión sin precedentes sobre los bosques del mundo, especialmente en los países en desarrollo. Los bosques templados se encuentran en todo el mundo. Los ecosistemas forestales cubren un tercio de la superficie terrestre del mundo, y el 93 por ciento de esa área ha sido clasificada como "bosques naturales" (FAO, 2010). Una gran parte del área de estos bosques ha sido modificada por la influencia antropogénica de varias maneras y por diferentes razones. En consecuencia, los bosques naturales representan distintos grados de "naturalidad" que no pueden describirse en categorías sencillas. Algunos bosques naturales han sido administrados durante largos periodos de tiempo para proveer una variedad de bienes y servicios que son significativos en el mantenimiento del bienestar humano (Gadow et al., 2007; Betts et al., 2008; Puettmann et al., 2015).

El ejemplo más destacado en términos de producción de madera en México es el estado de Durango. Estos bosques se distribuyen en la Sierra Madre Occidental en Durango, México, y se aprovechan selectivamente para sostener la economía de los ejidos y comunidades rurales. Alrededor del 67 por ciento de la superficie del estado de Durango es propiedad de 1,115 ejidos y comunidades. El tamaño promedio del bosque comunales en el estado de Durango es cercano a las 7,000 hectáreas en comparación con la parte sur del país donde el tamaño promedio de un bosque comunal es de aproximadamente 3,000 ha. El bosque de la Sierra Madre Occidental proporciona más del 50 por ciento del total de madera en rollo en el país y la mayoría de las exportaciones, básicamente de madera aserrada. Específicamente en la región de El Salto P.N., estos bosques han estado sujetos a la silvicultura selectiva durante más de un siglo para proporcionar una gran variedad de bienes y servicios a las comunidades locales (Corral-Rivas et al., 2006; Wehenkel, 2011; Vargas, 2013; Silva et al., 2014). Existen nuevas evidencias basadas en una serie de estudios permanentes de

observación forestal (Zhao et al., 2014; Corral Rivas et al., 2014; Padilla et al., 2020) que sugieren que la productividad potencial en Durango es alta con un promedio de 6.50 m³/ha/año, existiendo sitios con más de 20 m³/ha/año. Sin embargo, la producción parece ser muy sensible a la densidad residual, y niveles bajos pueden reducir significativamente la productividad forestal. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es definir umbrales teóricos de área basal residual que permitan un crecimiento óptimo de los subrodales comerciales en los bosques de la región forestal de El Salto, Durango.

La relación entre la densidad poblacional y el crecimiento poblacional se ha estudiado durante siglos en diversas disciplinas, tales como la demografía. Francois (1845), introdujo el primer modelo de esta relación cuando estudió el crecimiento poblacional, derivando el famoso modelo logístico.

Los científicos forestales, han estudiado la relación entre densidad y producción en experimentos de aclareos y los primeros conceptos básicos fueron desarrollados a mediados del siglo XX. Una teoría que describe la relación producción-densidad fue propuesta por Langsaeter (1941). Assmann (1961) siguió con un concepto de densidad-producción que evolucionó como una teoría fundamental de la ecología de la producción forestal y la silvicultura cuantitativa (Figura 3).

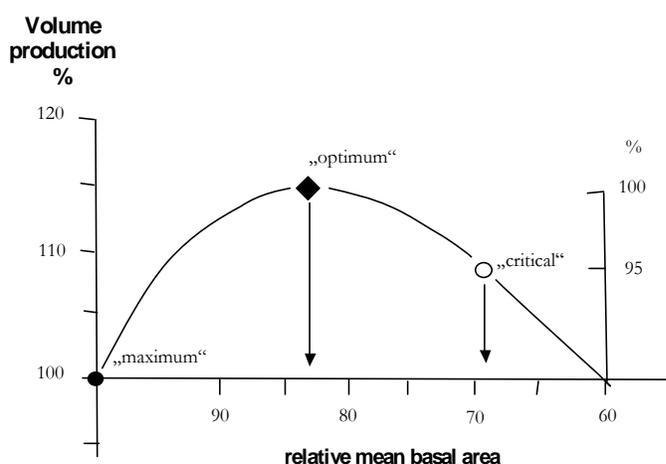


Figura 3. Relación entre densidad y producción forestal según Assmann (1961).

La producción (expresada como incremento corriente anual en volumen, marcado en porcentaje en la escala de la derecha) aumenta a medida la densidad máxima del rodal (100%) se reduce. La producción máxima se alcanza a niveles óptimos del área basal (por debajo de la densidad máxima). Una reducción adicional de la densidad conduce a la pérdida de producción. La densidad donde se consigue todavía el 95% de la máxima producción, se conoce como el área basal crítica (tomada de Gadow, 2004).

Según Assmann, la "*densidad óptima del rodal*" es aquella densidad que produce el volumen máximo, mientras que la "*densidad crítica*" es la densidad que todavía alcanza el 95% de la producción potencial máxima. Así, una densidad del rodal por debajo de la densidad crítica implicaría una pérdida de producción superior al 5% en comparación con el máximo potencial. Thomasius (1976, 1978) presentó evidencia de que la producción en bosques de *Picea* alcanzó un máximo en densidades por debajo de la densidad máxima. Una justificación para utilizar la relación de densidad óptima como una guía, es mejorar el potencial de la eficiencia del uso de los recursos por parte de los árboles dominantes, después de la eliminación de los individuos dominados o suprimidos (Assmann, 1961, p 227-228; Pretzsch, 2005). Otra justificación más importante es desarrollar relaciones empíricas de densidad que permitan estimaciones concretas de pérdidas de producción debido a niveles bajos de existencias en los bosques de Durango (Torres-Rojo, 2014).

La producción forestal depende del estado del bosque, así como de la condición del subrodal. El crecimiento total por unidad de área puede disminuir si la densidad residual se desvía del óptimo (Pretzsch et al., 2015). La producción neta suele ser baja en bosques muy densos y no manejados, donde el crecimiento puede ser contrarrestado por la mortalidad. La producción puede también reducirse después de una disminución severa de la densidad, ocasionada por la cosecha (Vanclay, 1996).

OBJETIVO

Definir umbrales de densidad residual teóricos que permitan un crecimiento cercano al óptimo de subrodales mixtos e irregulares bajo aprovechamiento en la región forestal de El Salto, Durango.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

Los datos utilizados para realizar la presente investigación provienen de un inventario forestal realizado en el año 2016 en 40 predios bajo manejo forestal de la UMAFOR 1008 El Salto. En total se usaron 47,810 sitios circulares de 1000 m², establecidos en 11,776 subrodales, a través de muestreo sistemático estratificado, con una intensidad promedio del 3% a nivel de predio. La figura 2 muestra la ubicación de los sitios de muestreo considerados en este estudio. (Figura 4).

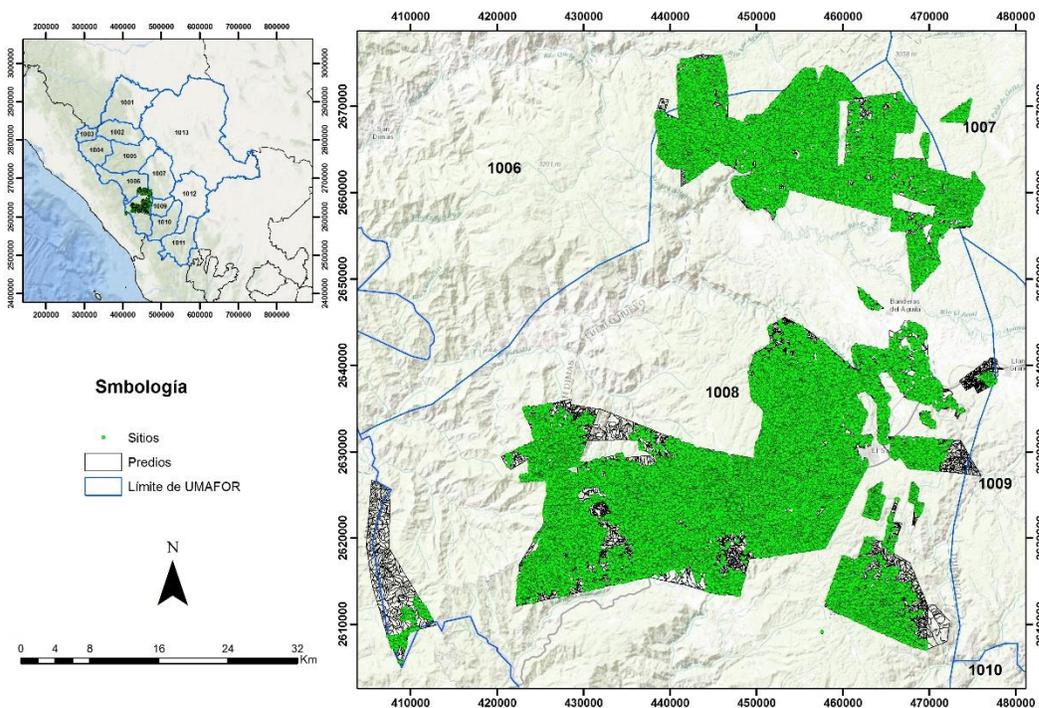


Figura 4. Ubicación Localización de los sitios de muestreo y subrodas que fueron analizados en la presente investigación.

En la tabla 2 se muestran estadísticos descriptivos de las principales variables de rodal obtenidas de la información de los sitios utilizados en este estudio: número de árboles por hectárea (N), área basal del rodal (G, $m^2 ha^{-1}$), diámetro medio cuadrático (Dg, cm), altura dominante (H0, m, estimada como la media de los 100 árboles más gruesos por hectárea (Assmann, 1970)), y número de especies arbóreas encontradas por sitio (S).

Tabla 2. Estadísticos descriptivos de las principales variables de rodal obtenidas a partir del análisis de los sitios de muestreo utilizados en este trabajo.

Variable	Inventario Forestal			
	Media	Max	Min	Std
<i>N</i>	515	2483	85	186.9
<i>G</i>	18.2	61.8	2.03	6.4
<i>Dg</i>	21.5	54.5	12.0	3.6
<i>H₀</i>	9.7	27.7	2.05	3.0
<i>S</i>	7.5	17	1	2.2

Los valores máximos y mínimos de las variables estimados de los sitios de muestreo son representativos de los bosques mixtos e irregulares de la región forestal de El Salto, Durango.

Métodos

Definición de los niveles sugeridos de densidad

Conceptualmente, el manejo de la densidad es el proceso de control del espacio disponible para el crecimiento de los árboles por medio de dos herramientas: la densidad inicial de plantación o de regeneración natural y los aclareos posteriores. La determinación de los niveles adecuados de densidad para una masa forestal en una situación determinada es un proceso complejo que depende de factores biológicos, tecnológicos, económicos y operacionales. Desde un punto de vista de producción, las alternativas de densidad que se pueden plantear para una especie y situación determinada pasan por el máximo aprovechamiento de los recursos de la estación. Sin embargo, este máximo aprovechamiento se puede lograr con un abanico razonablemente amplio de densidades que contempla unos límites superior e inferior que no conviene sobrepasar (Dean y Baldwin, 1996). El límite superior o densidad máxima que puede mantener la estación de modo que todos sus recursos son aprovechados por la masa, aunque cada árbol sólo obtiene lo imprescindible para sobrevivir sin que exista mortalidad natural. Esta situación extrema se corresponde con la

definición clásica de “*monte normal*”, en el que se consigue la máxima producción en biomasa (aunque, evidentemente, los productos obtenidos son de baja calidad). Por otra parte, límite inferior o densidad mínima que puede mantener la estación para que todos los recursos de la misma sean utilizados por la masa, de manera que cada uno de los árboles que la constituyen asimila todo lo que su condición genética y edad le permite, es decir, se desarrollan al máximo de su capacidad de crecimiento. Por debajo de esta densidad mínima los recursos de la estación no son aprovechados en su totalidad y, por tanto, se pierde parte de su potencial productivo (Diéguez-Aranda et al., 2009).

En la presente investigación las diferentes unidades mínimas de manejo o subrodas fueron clasificadas en tres clases de densidad residual (excesiva, sugerida y deficiente), después de haber sido caracterizadas en dos niveles de productividad de la siguiente manera: (i) nivel alto, para aquellos rodales que tienen una altura dominante del rodal mayor o igual a 12.5 metros; y (ii) nivel medio, rodales que tienen una altura dominante menor a 12 metros (Corral-Rivas et al., 2019).

Para establecer los límites de mínima y máxima densidad por nivel de productividad, se ajustó por regresión cuantílica no lineal (Koenker y Bassett, 1978), una ecuación potencial que relaciona el número de árboles por hectárea con el diámetro medio cuadrático:

$$N = a_1 D g^{a_2} \quad [1]$$

donde a_1 y a_2 son los parámetros a estimar mediante la regresión cuantílica.

El valor de los cuantiles inferior y superior utilizados en el ajuste fueron del 40%, y 80%, respectivamente, de acuerdo con las recomendaciones de Cochran et al. (1994), para la determinación del límite inferior y superior de la zona de manejo. La estimación de los parámetros de la ecuación [1] fue obtenida mediante el uso de la función “nlrq” del módulo “quantreg” (Koenker, 2004) del programa R (R Core Development Team, 2014). El análisis de la capacidad de ajuste de los modelos se basó en la significancia de los parámetros.

RESULTADOS

Nivel general o UMAFOR

En la tabla 3 se muestra la estimación de los parámetros de los modelos que definen los límites de mínima y máxima densidad por nivel de productividad que fueron ajustados mediante regresión cuantílica. Todos los parámetros resultaron ser significativos con $\alpha = 0.01$, lo que indica que las ecuaciones definen de manera adecuada los límites que clasifican a los rodales dentro de alguna de las tres clases de densidad residual (excesiva, sugerida y deficiente).

Tabla 3. Estimadores de los parámetros del modelo utilizado para determinar los límites cuantílicos de clases de densidad residual en bosques de la UMAFOR 1008.

Productividad alta					
Cuantil	Coefficientes	Valor	Error Estándar	Valor de t	Pr(> t)
40	a1	123438.58	29664.46	4.16	0.00003
	a2	-1.753	0.0756	-23.14	0.00000
80	a1	100190.72	24432.12	4.1	0.00004
	a2	-1.6	0.076	-20.93	0.00000
Productividad baja					
40	a1	12697.54	1431.54	8.87	0.00000
	a2	-1.1	0.37	-29.53	0.00000
80	a1	17542.29	1672.27	10.49	0.00000
	a2	-1.094	0.03137	-34.89	0.00000

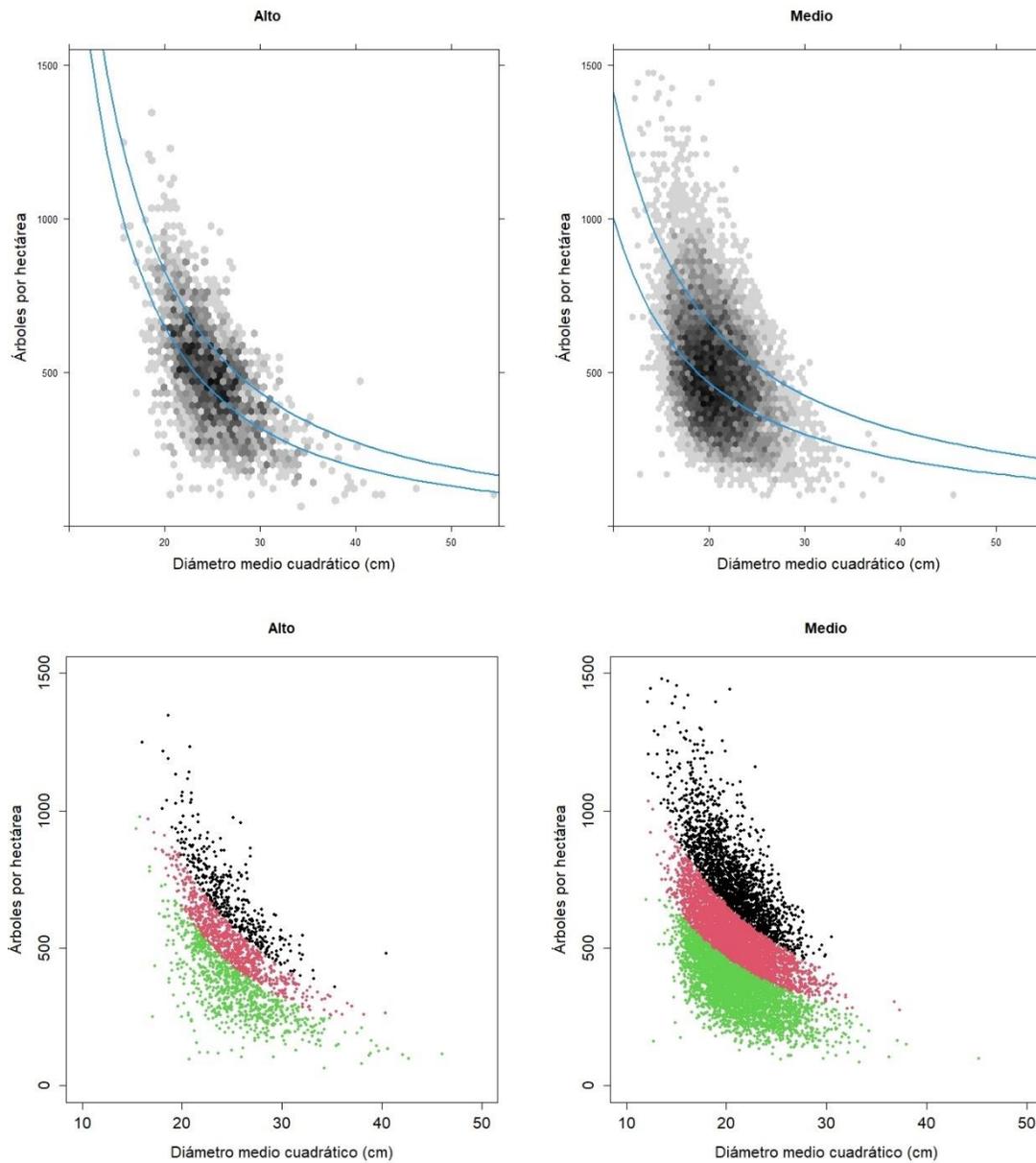


Figura 5. Límites de mínima y máxima densidad (líneas continuas) definidos por nivel de productividad a través de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica. Los diferentes colores indican el tipo de densidad residual de los rodales estudiados (negro = excesiva, rojo = sugerida y verde = deficiente).

En la Tabla 4 se muestra un resumen de la clasificación de los rodales respecto a la clase de densidad residual observada por nivel de productividad, y que fueron definidos por los límites de mínima y máxima densidad de la ecuación ajustada mediante regresión cuantílica. También se muestra el promedio de las principales

variables de rodal estimados por tipo de nivel de productividad. De acuerdo con estos resultados se puede observar que en área de estudio la mayoría de los rodales (un 82%) se clasifican como de productividad media, mediante el uso de la altura dominante del grupo de los pinos como indicador de productividad.

Respecto al estudio de la densidad residual, se observa que dentro del nivel de productividad alto el 41.75% de los rodales se clasifican como de densidad deficiente, un 38.88% poseen una densidad sugerida, y un 19.37% presentan una densidad excesiva. Por otro lado, para en el nivel de productividad medio se registró una cantida similar de subrodales con niveles de densidad deficiente o sugerida (3957, un 40%), mientras que un 20% de los mismos muestran un nivel de densidad excesiva.

Tabla 4. Número de rodales clasificados por el tipo de densidad residual y nivel de productividad, a través del uso de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica.

Nivel de productividad	Densidad residual	No. de rodales	Porcentaje	N	G	Dg	H0
Alto	Deficiente	871	41.75	165	16.97	25.29	14.08
	Sugerida	811	38.88	526	24.67	24.93	14.14
	Excesiva	404	19.37	685	32.26	24.91	14.19
	Suma/Promedio	2086	100.00	459	24.63	25.04	14.14
Medio	Deficiente	3957	40.01	361	11.92	20.87	9.15
	Sugerida	3957	40.01	546	18.16	20.84	9.54
	Excesiva	1975	19.97	761	25.17	20.79	10.13
	Suma/Promedio	9889	100.00	556	18.42	20.83	9.61

Comparativamente, el nivel de productividad medio registró una densidad residual mayor en las tres clases de densidad definidas en comparación con el nivel de productividad alto. El nivel de productividad alto por su parte mostró valores promedio de área basal del rodal y diámetro medio cuadrático significativamente superiores a los observados en el nivel de productividad medio como consecuencia de tener un mayor espacio de crecimiento para los árboles de manera individual. Lo anterior se explica debido a que, en el área de estudio, las unidades de manejo de mayor productividad suelen manejarse con tratamientos de silvicultura intensiva característicos del Método de Desarrollo

Silvícola, que consisten en cortas de aclareo principalmente (Corral-Rivas et al., 2015).

Nivel predio

En la tabla 4 se muestran los resultados de los niveles de densidad residual encontrados a nivel de predio en la UMAFOR 1008. De estos resultados se observa que aproximadamente un 75% de los predios prácticamente no contienen unidades mínimas de manejo clasificadas dentro del nivel de productividad alto, dominando en el área de estudio los subrodales de productividad media. Respecto a los niveles de densidad residual estudiados, se observó que, para ambos tipos de productividad, la mayoría de los subrodales pertenecen a la clase de densidad deficiente (44.48 y 46.41 % para los niveles de productividad alto y medio, respectivamente). Los resultados indican también que en promedio se encontró que para el nivel de productividad alto un 15 y un 20.4% de los sobrodales, exhiben niveles de densidad residual excesiva y sugerida, respectivamente. Mientras que, para el nivel de productividad medio, se encontró que el 17.21 y el 32.5 de las unidades de manejo en aprovechamiento pertenecen a los niveles de densidad residual excesiva y sugerida, respectivamente.

Las figuras 6 y 7 muestran en número de unidades mínimas de manejo por clase de densidad residual para los niveles de productividad alto y medio, respectivamente.

Tabla 5. Número de rodales clasificados por el tipo de densidad residual y nivel de productividad, a través del uso de la ecuación potencial ajustada mediante regresión cuantílica.

Ejido	Nivel de productividad alto						Nivel de productividad medio					
	Excesiva		Sugerida		Deficiente		Excesiva		Sugerida		Deficiente	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
Antonio Molina Deras	3	13.04	10	43.48	10	43.48	119	32.34	200	54.35	49	13.32
Com. Chavarría Nuevo	0	0.00	5	25.00	15	75.00	3	1.48	27	12.11	173	85.22
Ejido Borbollones	15	11.54	46	35.38	69	53.08	31	18.67	44	14.86	91	54.82
Ejido Chavarría Nuevo	28	23.53	48	40.34	43	36.13	142	23.71	245	34.12	212	35.39
Ejido Chavarría Viejo	55	20.68	93	34.96	118	44.36	178	25.46	245	25.39	276	39.48
Ejido Duraznito Picachos	1	0.76	23	17.42	108	81.82	10	6.85	33	11.87	103	70.55
Ejido El Salto Anexos	0	0.00	5	23.81	16	76.19	9	4.79	83	39.71	96	51.06
Ejido José María Morelos	0	0.00	0	0.00	14	100.00	1	0.38	58	20.94	204	77.57
Ejido La Campana	27	24.11	47	41.96	38	33.93	167	36.30	199	34.79	94	20.43
Ejido La Ciudad	108	23.08	232	49.57	128	27.35	181	37.87	208	21.99	89	18.62
Ejido Laguna del Progreso	0	0.00	0	0.00	1	100.00	40	11.02	179	49.18	144	39.67
Ejido Las Güeras	0	0.00	2	25.00	6	75.00	1	0.27	80	20.83	295	78.46
Ejido Las Trojas	0	0.00	0	0.00	9	100.00	0	0.00	7	14	34	82.93
Ejido Los Bancos	34	30.91	47	42.73	29	26.36	64	24.81	110	29.89	84	32.56
Ejido Mil Diez	6	10.17	16	27.12	37	62.71	81	15.28	276	46.86	173	32.64
Ejido Nueva Patria	0	0.00	1	25.00	3	75.00	32	4.14	259	33.33	482	62.35
Ejido San Antonio Anexos	1	14.29	0	0.00	6	85.71	9	5.36	64	36.57	95	56.55
Ejido San Esteban Anexos	20	12.74	68	43.31	69	43.95	241	30.51	382	40.34	167	21.14
Ejido Santa Lucia	0	0.00	0	0.00	0	0.00	57	10.22	243	43.55	258	46.24
La Cueva Anexos	0	0.00	3	33.33	6	66.67	56	18.86	100	32.68	141	47.47
La Victoria Anexos	94	29.01	157	48.46	73	22.53	404	43.63	419	33.52	103	11.12
Com. Las Flechas	0	0.00	0	0.00	1	100.00	22	6.73	173	52.74	132	40.37
Los Olvidados	0	0.00	0	0.00	3	100.00	25	15.34	74	44.58	64	39.26
Ej. San Antonio de las Basuras	1	16.67	0	0.00	5	83.33	22	5.68	114	29.01	251	64.86
Ej. Ampliación La Ciudad	0	0.00	0	0.00	3	100.00	0	0.00	0	0	9	100.00
Lote 12 Hda. Coyotes	0	0.00	1	100.00	0	0.00	1	5.56	10	52.63	7	38.89
PP Lote 1 El Tule	1	50.00	1	50.00	0	0.00	2	15.38	6	40	5	38.46
PP Lote 13 Hda. Coyotes	1	100.00	0	0.00	0	0.00	2	8.70	17	70.83	4	17.39
PP Lote 1 y 2 Hda. Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	8	44.44	10	55.56
PP Lote 2 y 3 Hda. Cotoyes	5	62.50	3	37.50	0	0.00	20	44.44	15	28.3	10	22.22
PP Lote 20 Hda. Coyotes	1	100.00	0	0.00	0	0.00	16	53.33	13	41.94	1	3.33
PP Lote 3 Sta. Edwiges	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	7.69	4	30.77	8	61.54
PP Lote 4 Hda. Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	10	41.67	9	37.5	5	20.83
PP Lote 52 Laguna Colorada	0	0.00	1	33.33	2	66.67	0	0.00	4	11.11	29	87.88
PP Lote 7 Hda Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	3	60.00	0	0	2	40.00
PP Lote C Hda Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	2	28.57	5	71.43
PP Lote E Hda Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	6	35.29	11	64.71
PP Lote H Hda Coyotes	0	0.00	0	0.00	0	0.00	5	11.63	15	34.88	23	53.49

Ejido	Nivel de productividad alto						Nivel de productividad medio					
	Excesiva		Sugerida		Deficiente		Excesiva		Sugerida		Deficiente	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
PP Santa Teresa	0	0.00	2	40.00	3	60.00	4	13.33	12	34.29	14	46.67
PP Lote 3 Llano Grande	3	60.00	0	0.00	2	40.00	16	47.06	14	35.9	4	11.76
Mínimo	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	1	3.33
Promedio	10	15.08	20	20.44	20	44.48	49	17.21	99	32.59	99	46.41
Máximo	108	100.00	232	100.00	128	100.00	404	60.00	419	70.83	482	100.00
SD	24	25.75	47	23.07	35	37.74	84	17.01	114	14.80	107	24.04

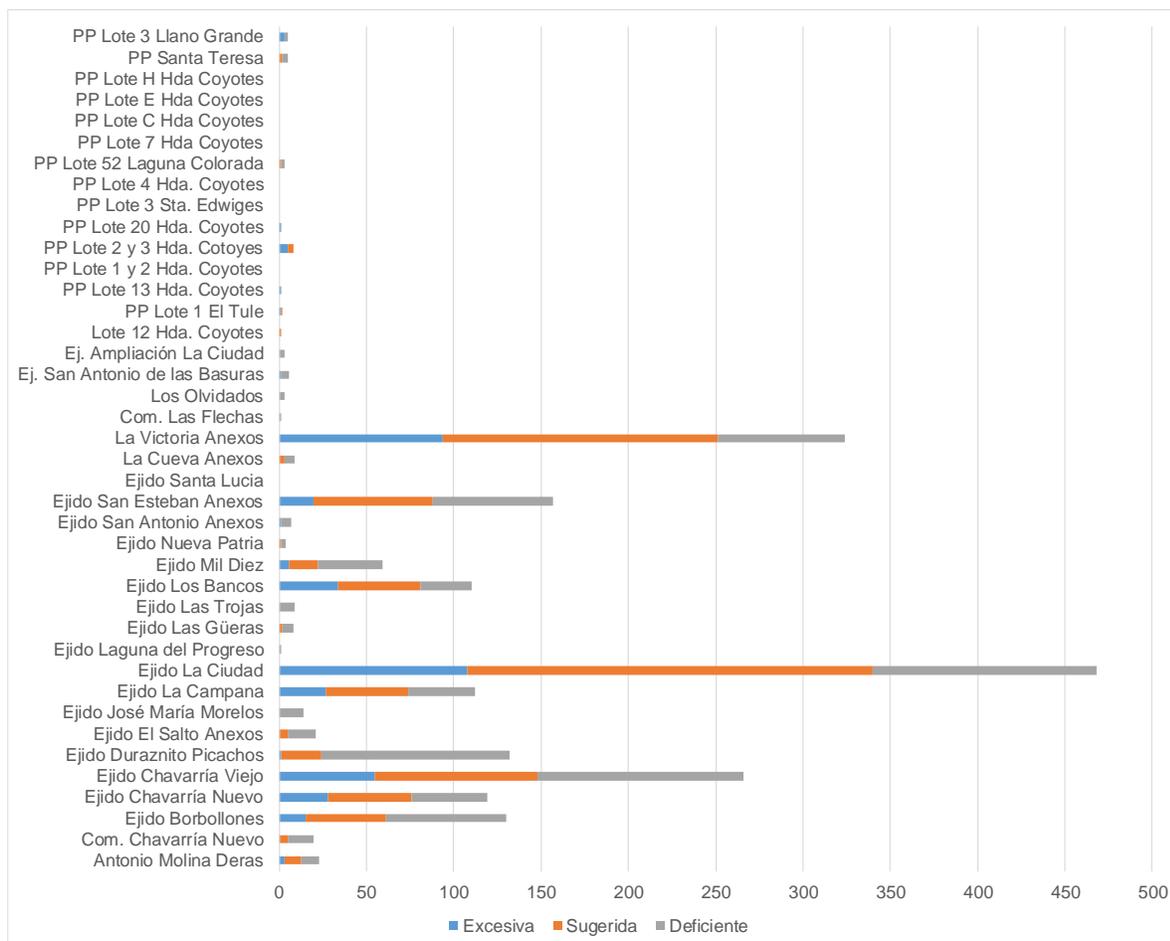


Figura 6. Número de unidades de manejo en producción por predio y nivel de densidad residual observada en el nivel de productividad alto.

De acuerdo con la Figura 6, dentro del nivel de productividad alto destacan con un número importante de subrodales de alta productividad los predios, La Victoria

y Anexos, San Esteban y Anexos, La Ciudad, Ejido Chavarría Viejo y Borbollones (Figura 6). Estos predios contienen unidades de manejo de las tres densidades residuales, destacando en número las de la clase de densidad sugerida, debido a que las áreas de nivel de productividad alto permiten tener un rango amplio de densidades residuales.

En la Figura 7 se observa que la mayoría de los predios contienen más unidades de manejo dentro del nivel de productividad medio, y por tanto la distribución de los niveles de densidad residual estudiados es más homogénea.

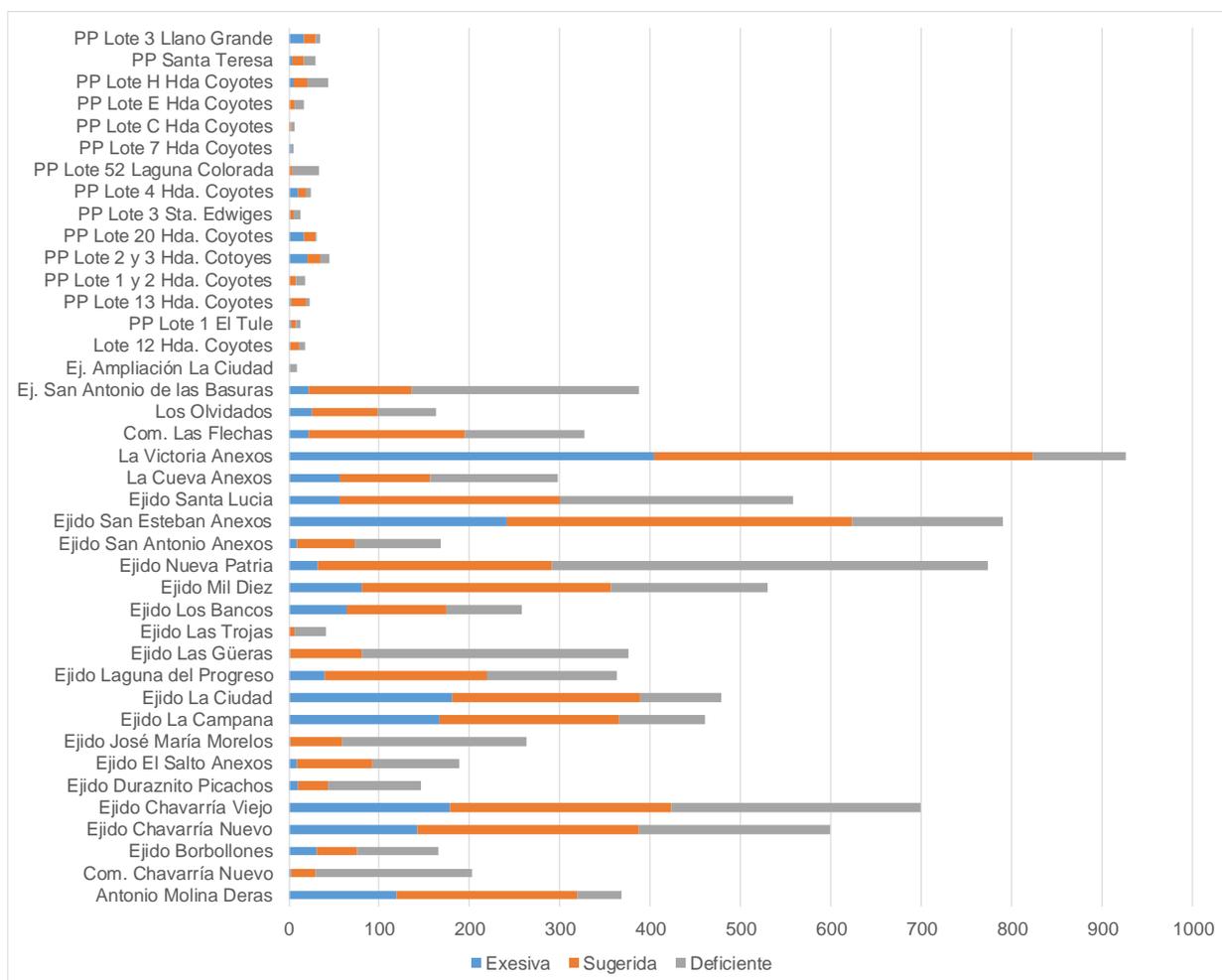


Figura 7. Número de unidades de manejo en producción por predio y nivel de densidad residual observada en el nivel de productividad medio.

La información de parcelas permanentes en la región indica que existe una relación lineal entre el área basal residual y la producción forestal. Por cada m^2 de área basal residual, el ICA resulta en un incremento de $0.38 m^3/ha/año$ (pendiente de la recta).

DISCUSIÓN

En este análisis la regresión cuantílica resultó ser útil para definir los límites de mínima y máxima densidad para clasificar las unidades de manejo dentro de una de tres clases de densidad residual de acuerdo con dos niveles de productividad, a través de una ecuación potencial que relaciona la densidad residual con el diámetro medio cuadrático en un número grande de parcelas de campo colectadas la Sierra Madre Occidental. Padilla-Martínez et al. (2020) reportaron también buenos resultados para un modelo de regresión cuantílica en la definición del límite máximo de densidad ajustado a datos de 217 parcelas permanentes en bosques de Durango, concluyendo que los niveles de producción por hectárea dependen principalmente del área basal residual dejada después de la cosecha. Otros autores como Vanclay (1988) y Nyland (2013) también reportan que el crecimiento en área basal y por consecuencia la productividad forestal depende de los niveles de densidad residual en bosques de Norte América del sur de Queensland, Australia, respectivamente.

Hay varias medidas de densidad forestal, y el número de árboles por hectárea es sólo una de ellas. Unas ventajas importantes del número de árboles por hectárea, es que está estrechamente relacionados con el área basal, y que al igual que esta última variable es fácil de evaluar. Con base en lo citado por algunos autores el área basal residual influye en la producción de los bosques de Durango, que se caracterizan por una regeneración continua y una cosecha regular, en los cuales la edad del rodal es indefinida (Padilla-Martínez et al., 2020). En ellos la

densidad residual o el área basal restante después de un evento de cosecha, es el resultado de la decisión del manejador.

De acuerdo con los valores de área basal media estimados en este trabajo para las clases de densidad residual deficiente, sugerida y excesiva definidas para los niveles de productividad alto (16.97, 24.67 y 32.26 m²/ha) y medio (11.92, 18.16 y 25.17 m²/ha), respectivamente (ver Cuadro 3), y haciendo uso del modelo de incremento periódico anual desarrollado por Padilla-Martínez et al. (2020) para los bosques de Durango ($IPA = 0.000788 * G^3 - 0.0000130 * G^4$), se estima un IPA de 2.77, 7.02 y 12.38 y de 1.07, 3.31, 7.35 m³/ha/año, para los subrodales con densidad residual deficiente, sugerida y excesiva de los niveles de productividad alto y medio, respectivamente. Estas estimaciones indican una fuerte evidencia de que la producción forestal en el área de estudio (expresada en términos de crecimiento en volumen y en área basal) se ve afectada significativamente por la densidad forestal. Resultados similares fueron reportados por Corral-Rivas et al. (2019).

Los resultados de este trabajo pueden en primera instancia ser usados para incrementar la producción forestal en el área de estudio mediante el manejo de la densidad, si se plantea como objetivo llevar a los subrodales que fueron caracterizados como de densidad residual deficiente a un nivel de densidad sugerida, logrando con ello subir los valores actuales de IPA en un 65.3 y 48%, para los niveles de productividad alto y medio, respectivamente. Lograr dicho objetivo representa sin duda un reto silvícola, ya que implica un tiempo largo de espera (aproximadamente 25 años), durante el cual la tasa actual de cosecha deberá ser disminuida de manera significativa.

Por otra parte, los subrodales clasificados como de densidad residual excesiva, que claramente muestran los valores más altos de IPA, requieren, por el contrario de una disminución de su densidad con la finalidad de mejorar la calidad de los árboles potenciales para llegar a la edad o diámetro deseable de corta, lo cual traerá consigo una ligera disminución en su IPA.

La preservación de la riqueza de especies de la Sierra Madre Occidental, específicamente en los bosques que están sometidos a manejo regular, requiere un enfoque no sólo basado en la evidencia científica, sino que también sea suficientemente práctico.

Los bosques naturales estudiados en este trabajo son altamente heterogéneos y las densidades residuales en este tipo de rodales pueden cambiar en poco tiempo, dependiendo de su manejo silvícola (Pagdee et al., 2006; Sikor, 2006). El desarrollo de conocimientos técnicos para el uso sostenido de estos recursos requiere del uso de técnicas de manejo de la densidad residual adecuadas para conservar tanto la producción como la biodiversidad. El método de "área basal residual" (Gadow et al., 2013) es un ejemplo de un nuevo concepto que tiene como objetivo mantener las densidades mínimas y mantener la diversidad de especies en los bosques naturales bajo aprovechamiento.

Tales guías de cosecha no siempre están disponibles y su desarrollo requiere un análisis de crecimiento en respuesta a los diferentes niveles de densidad, con datos de parcelas permanentes como los realizados por Corral-Rivas et al. (2019) y Padilla-Martínez et al. (2020). Sin embargo, para el área de estudio aún se necesitan observaciones empíricas que se recojan en estudios de observación natural de largo plazo y de análisis detallados para adaptar a las prescripciones silvícolas a determinadas circunstancias locales.

CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se desarrollaron nuevas alternativas silvícolas para el aprovechamiento sustentable de los bosques mixtos e irregulares en el estado Durango.

Se presenta un nuevo enfoque de clasificación de especies, basado en la agrupación de individuos como especies de dosel arbóreo y de subdosel. Esta simplificación significativa de una comunidad forestal compleja puede contribuir a mejorar la silvicultura y controlar más eficazmente las actividades de ordenación forestal. Este estudio contribuirá a mejorar la comprensión del funcionamiento de ecosistemas ricos en especies, porque permite realizar una caracterización adecuada de diferentes grupos de especies en términos de su dominancia en el dosel en ecosistemas forestales ricos en especies, y representa una forma viable para simplificar los métodos de control para el aprovechamiento selectivo de los bosques de la región forestal de El Salto, Durango.

La integración de especies a grupos bien definidos puede también facilitar la modelización de la dinámica de estos ecosistemas. La agrupación de especies arbóreas también tiene implicaciones prácticas importantes, debido a que un objetivo particularmente desafiante de la silvicultura de los sistemas de cubierta forestal continua es obtener beneficios económicos sin modificar las características claves del ecosistema natural. El método ofrece la ventaja de poder definir alternativas de gestión por grupos de especies y tamaños para basar el control de la cosecha en dichos grupos.

Basados en la evidencia científica que indica que el área basal residual en los bosques mixtos e irregulares de Durango se encuentra significativamente relacionada con el crecimiento en volumen, en un segundo estudio se definieron niveles teóricos de densidad residual sugeridos para la región forestal de El Salto, con la finalidad de ofrecer una alternativa silvícola para optimizar la producción forestal. Los resultados indican que el uso de estos niveles de densidad residual en el área en producción, pueden traducirse en un incremento muy importante

en la producción forestal de la región, trayendo consigo beneficios ambientales, sociales y económicos para sus habitantes.

Los resultados también indican que lograr dicho objetivo en las áreas con densidad deficiente, representa sin duda un reto silvícola, ya que implicará un tiempo largo de espera, durante el cual la tasa actual de cosecha deberá ser disminuida de manera significativa. Los resultados también señalan la existencia de subrodas con densidad excesiva, los cuales, por el contrario requieren de una disminución de su densidad actual con la finalidad de mejorar la calidad de los árboles potenciales para llegar a la edad o diámetro deseable de corta.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue apoyada por el fondo sectorial de CONAFOR-CONACYT (proyecto: 115900), y por acuerdos específicos de colaboración entre la Comisión Nacional Forestal y la Universidad Juárez del Estado de Durango.

REFERENCIAS

- Assmann E, 1961: Waldertragskunde. Organische Produktion, Struktur, Zuwachs und Ertrag von Waldbeständen. BLV Verlagsgesellschaft, München, Bonn, Wien, 490 p
- Assmann, E. 1970. Principles of Forest Yield Study. Pergamon Press, New York, 506 p.
- Betts, R. A., Y. Malhi and J. T. Roberts (2008): The future of the Amazon: new perspectives from climate, ecosystem and social sciences. Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences 363: S.1729–1735.
- Corhran, P. H.;Geist, J.M.; Clemens, D. L.; Clausnitzer, Rodrick R.; Powell, David C. 1994 Suggested stocking levels for stands in northeastern Oregon and southeastern Washington. Reserch Note PNW-RN-513 Portiand, OR:U.S. Department of Agricuture. Forest Service. Pacific Nortwest Research Station 21 p.
- Corral-Rivas, J.J. (2006): Models of tree growth and spatial structure for multi-species, uneven-aged forests in Durango (Mexico). PhD. Thesis. University of Göttingen. 104 p.
- Corral-Rivas, S., Juan Álvarez-González, Felipe Crecente-Campo, José Corral-Rivas, 2014: Local and generalized height-diameter models with random parameters for mixed, uneven-aged forests in Northwestern Durango, Mexico. Forest Ecosystems 2014, 1:6 (26 February 2014).
- Corral-Rivas J. J.,González-Elizondo M. S., Lujan-Soto J. E. & Klaus von Gadow (2019) Effects of density and structure on production in the communal forests of the Mexican Sierra Madre Occidental, Southern Forests: a Journal of Forest Science, 81:1, 1-10, DOI: 10.2989/20702620.2018.1463152.
- Dean V. T.J. and Baldwin Jr B. (1996). The relationship between Reineke's stand-density index and physical stem mechanics. Forest Ecology and Management Volume 81, Issues 3, February 1996, Pages 25-34.

- Diéguez-Aranda, U., Rojo-Alboreca, A., Castedo-Dorado, F., Álvarez-González, J. G., Barrio-Anta, M., Crecente-Campo, F., González-González, J. M., C. PérezCruzado, R. J. Rodríguez-Soalleiro, C. A. López-Sánchez, M. A. BalboaMurias, J. J. Gorgoso-Varela y F. Sánchez-Rodríguez. 2009. Herramientas silvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. 272.
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment 2010. FAO Forestry Paper 163. Rome (available at <http://www.fao.org/forestry/fra/fra2010/en/>).
- FAO, 2015: Planted Forests. <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/en/> (retrieved on 1st September, 2015).
- Gadow, K. v., 2004: Waldstruktur und Wachstum. Universitätsdrucke Göttingen.
- Gadow, K. v., Kurttila, M., Leskinen, P., Leskinen, L., Nuutinen, T. and Pukkala, T., 2007: Designing forested landscapes to provide multiple services. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources 2007 (2), No. 038: 1-15.
- Gadow, K. v., Zhao XH and Corral Rivas, J.J., 2013: Retention Strategies for Multi-Species Forests. Proc. International Symposium for the 50th Anniversary of the Forestry Sector Planning in Turkey, 26-28 November 2013, Antalya.
- Garber, S.M. and D.A. Maguire. 2004. Stand productivity and development in two mixed-species spacing trials in the central Oregon cascades. For. Sci. 50:92-105.
- García, E. (1989). Modificaciones al sistema de clasificación climática de kôpen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Offset Larios, México D.F., 165 p.
- Koenker R, Bassett G. 1978. Regression quantiles. Journal of the Econometric Society 46: 33–50.
- Koenker R., Quantile regression for longitudinal data, Journal of Multivariate Analysis, Volume 91, Issue 1, 2004, Pages 74-89.

- Langsaeter, A. (1941): Omtynning I enaldret gran-og furuskog Meddelelser. Fra Det norske Skogforsøksvesen 8: S. 131–216.
- Lutz, W., Sanderson, W. & Scherbov, S. The end of world population growth. *Nature* 412, 543–545 (2001). <https://doi.org/10.1038/35087589>
- Nyland, B. D. (2013): Selection System – its Character and Application. Unpublished manuscript: 53 p.
- Padilla-Martínez, Jaime R.; Corral-Rivas, José J.; Briseño-Reyes, Jaime; Paul, Carola; López-Serrano, Pablito M.; v. Gadow, Klaus. 2020. "Patterns of Density and Production in the Community Forests of the Sierra Madre Occidental, Mexico" *Forests* 11, no. 3: 307.
- Pagdee, A. Y-su Kim, and P. J. Daugherty. 2006. What Makes Community Forest Management Successful: A Meta- Study From Community Forests Throughout the World. *Society & Natural Resources* 19:33-52.
- Pretzsch, H. 2005. Diversity and productivity in forests: Evidence from long-term experimental plots. In: *Forest Diversity and Functions: Temperate and Boreal Systems*. Scherer-Lorenzen, M., Ch. Körner, and E.D. Schulze (eds). Springer-Verlag Berlin. *Ecological Studies* 176:41-63.
- Puettmann, K.J., Scott Wilson, Susan C Baker, Pablo J Donoso, Lars Drössler, Girma Amente, Brian D Harvey,
- Sikor, T. 2006. Analyzing community-based forestry: Local, political and agrarian perspectives. *Forest Policy and Economics* 8:339– 349.
- Silva-Flores, R., G. Pérez-Verdín and CH. Wehenkel (2014): Patterns of Tree Species Diversity in Relation to Climatic Factors on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Plos One* 9(8):e105034.
- Thomasius, H. O. u. Thomasius, H., 1976: Anwendungsbeispiel zu einem Verfahren der Berechnung ertragskundlich optimaler Bestandesdichtewerte und Diskussion dieses Verfahrens. Informationen TU Dresden, Sektion Forstwirtschaft, Bereich Waldbau und Forstschutz, Tharandt: 21-76.
- Thomasius, H. O. u. Thomasius, H., 1978: Ableitung eines Verfahrens zur Berechnung der ertragskundlich optimalen Bestandesdichte. *Beiträge f. d. Forstwirtschaft* 12 (79).

- Thomasius, H. O. und H. Thomasius (1978): Ableitung eines Verfahrens zur Berechnung der ertragskundlich optimalen Bestandesdichte. Beiträge f. d. Forstwirtschaft 12 (79).
- Torres Rojo, J.M. (2000). Sostenibilidad del volumen de cosecha calculado con el método de ordenación de montes. Madera y Bosques 6(2), 57–72.
- Torres-Rojo, J.M., 2014: Exploring Volume Growth-Density of Mixed Multiaged Stands in Northern Mexico. *Agrociencia* 48: 447-461. 2014
- Vanclay, J.K. and Henry, N.B., 1988. Assessing site productivity of indigenous cypress pine forest in southern Queensland. *Commonwealth Forestry Review* 67:53-64.
- Vanclay, J. K. (1988): A stand growth model for cypress pine. In: J.W. LEECH, R.E. MCMURTRIE, P.W. WEST, R.D. SPENCER and B.M. SPENCER (eds): *Modelling Trees, Stands and Forests. Proceedings of a Workshop in August 1985 at the University of Melbourne. School of Forestry, University of Melbourne, Bulletin No. 5*, pp. 310–332.
- Vargas, Benedicto (2013): Manual de mejores prácticas de manejo forestal para la conservación de la biodiversidad en ecosistemas templados de la región norte de México. CONAFOR, Zapopan, Jalisco, 87p.
- Wehenkel C., Corral-Rivas J.J., Hernández-Díaz J.C., Gadow K. v. (2011): Estimating Balanced Structure Areas in multi-species forests on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Annals of Forest Science* 68: 385–394.
- Zhao, X.H., Corral-Rivas, J.J., Zhang, C.Y, Temesgen, H. and Gadow, K. v., 2014: Forest observational studies-an essential infrastructure for sustainable use of natural resources. *Forest Ecosystems* 2014: 1-8.