

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
CHAPINGO



División de Ciencias Forestales

Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD EN *Pinus pseudostrobus* A PARTIR DE
VARIABLES DASOMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MÉXICO

Tesis de maestría

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

Maestro en ciencias forestales

Presenta

Ávila Valdivia Alfonso



DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
GRUPO DE EXAMENES PROFESIONALES

Chapingo, Edo. México, Junio 2018.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

**ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD EN *Pinus pseudostrobus* A PARTIR DE
VARIABLES DASOMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MÉXICO**

TESIS DE MAESTRÍA

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Forestales

Presenta

Ing. Alfonso Ávila Valdivia

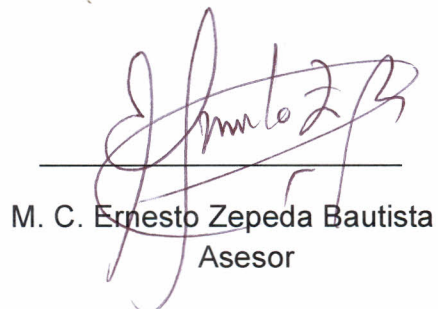
Comité de tesis



Dr. Francisco J Zamudio Sánchez
Director de Tesis



Dr. Hugo Ramirez Maldonado
Co-Director



M. C. Ernesto Zepeda Bautista
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres: **Alfonso Ávila Moreno** y **María Guadalupe Valdivia Betancourt**, quienes fueron el motor de ayuda para poder culminar exitosamente mis estudios de posgrado, gracias por haber sido el hombro de apoyo en todo momento.

A mis hermanas **Miriam**, **Lesli** e **Ilce** que fueron parte fundamental en el logro de haber culminado la maestría en ciencias en ciencias forestales, todo en este mundo tiene un propósito y por el momento se ha culminado uno, gracias hermanas.

A mi hijo **Gonzalo Ávila Andrade** porque fue mi inspiración para poder culminar esta meta más en mi vida profesional.

AGRADECIMIENTOS

Durante el transcurso de mis estudios de Maestría y elaboración del trabajo de tesis, tuve la suerte de contar con el apoyo de un gran número de personas a través de algunas instituciones, sin el cual no hubiese sido posible el logro de esta meta.

El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el aporte económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría ya que sin este apoyo no podría haberlos cumplido.

A mis padres porque me han permitido tener triunfos y derrotas que han dejado huellas de sabiduría en mi vida.

Gracias a mi ALMA MATER, la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de realizar los estudios de posgrado.

A la División de Ciencias Forestales que me acogió en sus aulas para recibir las invaluable enseñanzas y conocimientos de los maestros que fueron el pilar para mi formación de grado.

Al Dr. Francisco José Zamudio Sánchez por aceptar dirigir este trabajo de tesis, por sus conocimientos académicos y morales que me fueron de mucha ayuda en la elaboración de este tema de investigación.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado por aceptar formar parte como co-director del comité de tesis.

Al M. C. Ernesto Marcelo Zepeda Bautista por su disposición en la realización de este trabajo, por su apoyo profesional, académico y moral y sobre todo por sus conocimientos transmitidos con lo cual pude lograr una superación profesional importante.

ÍNDICE GENERAL

Capítulo	Páginas
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE CUADROS	vi
RESUMEN GENERAL	vii
GENERAL SUMMARY	viii
CAPITULO 1	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos particulares	4
1.3. REVISIÓN DE LITERATURA	5
1.3.1. Antecedentes	5
1.4. CONCEPTOS	8
1.4.1. Densidad	8
1.4.2. Densidad comparativa o relativa.....	9
1.4.3. Espacio de crecimiento.....	9
1.4.4. Población normal.....	10
1.4.5. Índice de densidad	10
1.4.6. Número de árboles por unidad de superficie	11
1.4.7. Área basal por unidad de superficie.....	11
1.5. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL RODAL.....	11
1.5.1.1. Índice de densidad del Rodal o Índice de Reineke	14
1.5.1.2. Modelo de autoaclareo de Yoda	17
1.5.1.3. Relación árbol/área (RAA)	17
1.5.1.4. Factor de competencia de copas (FCC)	18
1.5.1.5. Tabla de productividad para rodales.....	20
1.5.1.6. Guías de densidad	21
CAPÍTULO 2	23
Estimación de la densidad en <i>Pinus pseudostrobus</i> en dos ejidos dentro del Área Natural Protegida del Nevado de Toluca, Estado de México	23
2.1. Resumen.....	23

Estimation of density in <i>Pinus pseudostrobus</i> in two ejidos within the Nevado de Toluca Natural Protected Area, State of Mexico	24
2.2. Abstract	24
2.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	25
2.3.1. Clima	26
2.3.1.1. Clima de Ejido Mesón Viejo	26
2.3.1.2. Clima de Ejido Agua Bendita	26
2.3.2. Suelo	27
2.3.2.1. Suelos de Ejido Mesón Viejo	27
2.3.2.2. Suelos de Ejido Agua Bendita	27
2.3.3. Vegetación	28
2.3.3.1. Vegetación de Ejido Mesón Viejo	28
2.3.3.2. Vegetación de Ejido Agua Bendita	29
2.3.3.3. <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl	29
3.1.3.1.1. <i>Taxonomía</i>	30
3.1.3.1.2. <i>Distribución y hábitat</i>	30
2.4. METODOLOGÍA	30
2.4.1. Planeación	31
2.4.2. Determinación del tamaño de muestra	31
2.4.3. Diseño de muestreo	33
2.4.4. Obtención de datos en campo	33
2.5. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA	36
2.5.1. Estimación de la densidad	36
2.5.1.1. <i>Índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR)</i>	36
2.5.1.2. <i>Factor de competencia de copas (FCC)</i>	37
2.5.2. Elaboración de diagrama de densidad	37
2.6. RESULTADOS	38
2.6.1. Índice de densidad de rodales (IDRR)	38
2.6.2. Factor de competencia de copas (FCC)	48
2.7. DISCUSIONES	52
2.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

ÍNDICE DE FIGURAS

	Páginas
Figura 1. Localización del área de estudio.....	25
Figura 2. Sitios de muestreo en el Ejido Mesón Viejo	35
Figura. 3 Diagrama de densidad.	41

ÍNDICE DE CUADROS

	Páginas
Cuadro 1. Análisis del modelo de Reineke (1933) para el ejido Meson Viejo.....	38
Cuadro 2. Análisis del modelo de Reineke (1933) para el Ejido Agua Bendita.....	38
Cuadro 3. Número de árboles por hectárea de acuerdo con el IDRR.....	42
Cuadro 4. Valores de las líneas proporcionales para un número de árboles dado en intervalos de 100.....	43
Cuadro 5. IDRR de acuerdo con el diámetro cuadrático de cada uno de los rodales	44
Cuadro 6. IDRR de acuerdo con el diámetro cuadrático de cada uno de los rodales	46
Cuadro 7. Área basal por diámetro cuadrático.....	47
Cuadro 8. Análisis de varianza para el modelo del diámetro de copa.....	48
Cuadro 9. Área máxima de copa, número de árboles por ha, y área basal para <i>Pinus pseudistrobis</i> en el Ejido Mesón Viejo.....	50
Cuadro 10. Área máxima de copa, número de árboles por ha, y área basal para <i>Pinus pseudistrobis</i> en el Ejido Agua Bendita	51
Cuadro 11. Comparación de valores de pendientes de diferentes estudios para especies forestales comerciales	52

RESUMEN GENERAL

ESTIMACIÓN DE LA DENSIDAD EN *Pinus pseudostrobus* A PARTIR DE VARIABLES DASOMÉTRICAS EN EL ESTADO DE MÉXICO

El presente estudio muestra un análisis del bosque, en el Ejido Mesón viejo Dotación, Municipio de Temascaltepec, y en el Ejido Agua Bendita, Municipio de Amanalco, Estado de México.

Se utilizaron sitios de muestreo circulares de diámetro 17.84 m con una superficie de 1000 m². Con la información obtenida, se ajustaron modelos matemáticos para calcular el índice de densidad de rodal y factor de competencia de copas, estos modelos son herramientas útiles para estimar la densidad arbórea en un rodal determinado, con el objetivo de elaborar un diagrama de densidad para darle un mejor uso al bosque en estudio.

En ambos ejidos el índice de densidad de rodal tuvo un coeficiente de determinación del 99%, la densidad estimada resulta de la ecuación $N = \beta_0 * Dq^{-\beta_1}$, a través de esta ecuación se obtuvieron los parámetros: un valor de la pendiente $\beta_1 = -1.667$ y $\beta_1 = -1.4399$, y un valor de $\beta_0 = 170600$ y $\beta_0 = 60895.8059$, con el valor del diámetro cuadrático medio de referencia (25cm) se obtuvo un total de 797 y 591 árboles por hectárea respectivamente para los ejidos anteriormente señalados; de acuerdo a los valores obtenidos para cada uno de los parámetros calculados; y para el factor de competencia de copas (FCC) se obtuvo un 94% para el Ejido de Mesón Viejo y un 92.9 % de variabilidad en la relación del diámetro de copa y el diámetro normal en el Ejido de Agua Bendita.

Palabras clave: manejo, densidad, parámetros, diagrama de densidad, bosque.

Tesis: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Alfonso Ávila Valdivia

Director de Tesis: Dr. Francisco J Zamudio Sánchez

GENERAL SUMMARY

ESTIMATION OF DENSITY IN *Pinus pseudostrabus* FROM VARIABLES DASOMETRICS IN THE STATE OF MEXICO

The present study shows an analysis of the forest, in Ejido Mesón Viejo Dotación, Municipio de Temascaltepec, and in Ejido Agua Bendita, Municipio de Amanalco, Estado de Mexico.

Circular sampling sites with a diameter of 17.84 m and a surface area of 1000 m² were used. With the obtained information, mathematical models were adjusted to calculate the stand density index and crown competition factor, these models are useful tools to estimate the tree density in a specific stand, with the objective of elaborating a density diagram to give better use of the forest under study.

In both ejidos the density index of stand had a coefficient of determination of 99%, the estimated density results from the equation $N = \beta_0 * Dq^{-\beta_1}$, through this equation the parameters were obtained: a value of the slope $\beta_1 = -1,667$ and $\beta_1 = -1.4399$, and a value of $\beta_0 = 170600$ and $\beta_0 = 60895.8059$, with the value of the mean square reference diameter (25cm), a total of 797 and 591 trees per hectare were obtained respectively for the previously mentioned ejidos; according to the values obtained for each of the calculated parameters; and for the competition factor of cups (FCC) 94% was obtained for the Ejido de Mesón Viejo and 92.9% variability in the ratio of the diameter of the cup and the normal diameter in the Agua Bendita Ejido.

Keywords: management, density, parameters, density diagram, forest.

Thesis: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Alfonso Ávila Valdivia

Advisor: Dr. Francisco J Zamudio Sanchez

1.1. INTRODUCCIÓN

Los bosques de un país son relevantes por su producción maderable, pero también son de una importancia que puede ser mayor para las comunidades locales y para la población en general. Por su potencial de producción maderable y no maderable, los bosques y selvas son fuente importante de empleo e ingreso para la población localizada dentro o cerca de las áreas arboladas. En México, dicho potencial ha sido aprovechado muy poco. La producción forestal se registra con mayor detalle en las estadísticas, pero hay otros valores de los bosques y selvas que no aparecen con claridad en las cifras oficiales.

Las coníferas, en particular, los pinos son los recursos primarios más demandados por la industria maderera de México. Por ello, representan un valor económico significativo para la sociedad, sin dejar de lado las funciones ecológicas, estéticas, culturales o de otra índole que posee este tipo de recurso (Aragón *et al.*, 2010). Los pinos se encuentran entre los organismos genéticamente más diversos. Su sistema genético, que favorece la creación y recombinación de la variación genética, les ha permitido evolucionar en conjunto con los cambios ambientales, tanto espaciales como temporales, a los que han estado sometidos desde que iniciaron la divergencia de su forma ancestral hace poco más de 200 millones de años.

Sin embargo, esta diversidad se ha visto, sobre todo en los últimos años, seriamente amenazada, debido a la alta tasa de deforestación que se ha ido produciendo. Se estima que en México anualmente se deforestan alrededor de 212 mil hectáreas por diversas causas, entre ellas resaltan incendios forestales, cambios del uso de suelo, plagas y enfermedades y aprovechamiento ilegal (Santillana, 2013).

Challenger (2003) menciona que la composición de los bosques de pinos de México es muy variable de una región a otra, e incluso de un sitio a otro dentro de cada región, lo cual se debe a la enorme heterogeneidad de los tipos y subtipos

climáticos, a la inclinación y orientación de las laderas, al tipo y profundidad del suelo y a la compleja historia biogeográfica de los ecosistemas que pertenecen a esta zona ecológica. Debido a esta heterogeneidad ambiental, las especies se encuentran distribuidas en forma de parches. En términos generales y en un mosaico ambiental dado, un manchón o parche puede definirse como “una unidad especial diferente de su entorno ya sea en apariencia o en sus propiedades”, aunque, el discernimiento de estos parches depende fundamentalmente de la escala espacial (Wu y Loucks, 1995).

La conservación y el buen estado de los bosques de coníferas requieren de técnicas que posibiliten su sostenimiento y el de los recursos naturales asociados con ellos. El manejo de la densidad de los rodales significa desarrollar una actividad silvocultural, que ayuda a ejercer un mejor control sobre la estructura de regeneración del bosque. También, contribuye con el establecimiento de la plantación y el incremento de su productividad; en la determinación del tamaño de los árboles y con la planeación de manejo del turno el cual es el tiempo transcurrido hasta la cosecha final (Aragón *et al.*, 2010).. La planeación de un manejo que garantice su uso ininterrumpido debe apoyarse en instrumentos cuantitativos que permitan realizar la evaluación de los recursos a manejar.

Han surgido varios métodos para evaluar la densidad del rodal, entre los más conocidos se pueden mencionar: el área basal, el índice de espaciamiento relativo, el índice de densidad del rodal y el factor de competición de copas. Los diagramas de manejo de la densidad constituyen una herramienta valiosa para la planeación de regímenes de tratamientos silvícolas que garanticen una óptima ocupación del sitio, de acuerdo con los objetivos de producción propuestos en éste.

En la práctica forestal de México se han realizado varios trabajos que evalúan estas metodologías, las cuales han promovido el uso del Índice de Densidad del Rodal (IDR), el cual ha sido considerado como una de las herramientas más útiles para traducir objetivos de manejo dentro de un programa de aclareos. La utilidad del IDR es que expresa, de forma matemática, la relación entre el tamaño de los árboles y la densidad del rodal (McCarter y Long, 1986), con lo cual se puede determinar el índice máximo para la especie y es posible definir diferentes bandas para el manejo de la densidad de los aclareos del rodal, mismos que se ajustan a los objetivos de

producción propuestos (cantidad de biomasa, para extracción de pulpa, producción de postes o de madera para aserrío).

El manejo sustentable de los recursos naturales se debe partir de propuestas provenientes de la evaluación de un inventario de las áreas boscosas, para que se puedan conocer los parámetros dasométricos y tener el escenario actual en cuanto a las especies de interés, número de árboles, diámetros, alturas, edad, área basal, volumen e incrementos del bosque (Carrillo, 2008).

De aquí la importancia de medir estas variables de tal forma que posibilite la clasificación y cuantificación de las especies arbóreas establecidas, así como identificar las áreas de producción, conservación y de restauración para canalizar las posibles propuestas de manejo forestal y planear las acciones silvícolas futuras en tiempo y espacio de la masa forestal. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue estimar la densidad de rodal para cada una de las clases diamétricas en pino y oyamel mediante la utilización del Índice de densidad del rodal de Reineke en sitios seleccionados a partir de ciertas características de manejo y conservación.

Los datos se recolectaron en diferentes predios del Área Natural Protegida de Flora y Fauna (ANPFF) ubicada en las inmediaciones del Nevado de Toluca, Estado de México. Para su obtención se realizó un muestreo sistemático; las variables sometidas fueron diámetro y altura.

Sobre este marco de referencia, el presente trabajo se enfoca en la estimación del índice de densidad de Reineke en *Pinus pseudoestrobis* en el Ejido “Mesón Viejo Dotación”, Municipio de Temascaltepec, así como en el Ejido de Agua Bendita, Municipio de Amanalco, ambos en el Estado de México, permitiendo caracterizar las condiciones estructurales de esta especie en el área de estudio.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Estimar la densidad de rodal a partir de ciertas características de manejo y conservación en dos predios de *Pinus pseudostrobus* en el área natural protegida del Nevado de Toluca.

1.2.2. Objetivos particulares

- i. Evaluar modelos matemáticos del índice de densidad comparando parámetros para conseguir una estimación de la producción de los bosques de acuerdo a su densidad idónea.
- ii. Construir índices de densidad a través de la simulación del índice de densidad del rodal de Reineke.
- iii. Comparar los parámetros obtenidos en los predios en estudio.

1.3. REVISIÓN DE LITERATURA

1.3.1. Antecedentes

El primero en México en reportar estudios relacionados a conceptos de densidad fue Zepeda (1984), reportó la manera atinada de como estimar la densidad, con el uso del índice de densidad del rodal de Reineke, la relación área-árbol y, el factor de competencia de copas. Un antecedente análogo para determinar la densidad de los rodales fue reportado por Torres (1984) en Zoquiapan, México, éste estudio no fue utilizado para la elaboración de alguna guía sino como componentes para elaborar una tabla de producción.

Aguirre (1985), generó índices de densidad para *Pinus patula*, en Perote, Veracruz. Estos fueron la base para detectar las etapas silvícolas en que ocurre la mortalidad por exceso de densidad.

De tal modo la elaboración de las primeras guías de densidad se remonta a casi treinta años en el estado de Hidalgo y en Zacatlán Puebla para rodales de *Pinus patula* (Becerra, 1986), adicionalmente se han integrado guías de densidad para *P. hartwegii* en el estado de México (Zepeda y Villareal, 1987),

Balderas y Rodriguez (1989) citado por Monroy (1997) construyeron guías de densidad para masas arboladas de *P. montezumae* Lamb., del campo experimental Forestal San Juan Tetla, Puebla, la primera guía consideró como base para definir la línea de densidad mínima (línea B), el factor de competencia de copas, y para la definición de densidad máxima (línea A), la relación área-árbol, para la segunda guía se utilizó el mismo factor de competencia de copas para la definición de la línea B, y para la línea de densidad máxima, se estimó el índice de densidad de rodales de Reineke y, finalmente, para la obtención de la tercera guía se utilizó la metodología propuesta por Seymour y Smith (1987).

Luna (1991) menciona que en la región de El Salto, Durango, se elaboraron cuatro guías de densidad para *P. engelmannii* Carr., *P. herrerae* Mart., *P. leiophylla* Schl. et Cham y *P. teocote* Schl. et Cham, utilizando la metodología propuesta por Gingrich (1967).

García y Hernández (1995), elaboraron dos guías de densidad para *P. patula* Schl. et Cham., en la región de Macuitianguis, Oaxaca; la primera utilizó la relación área-árbol y el factor de competencia de copas, y la segunda se construyó mediante el índice de densidad de rodales de Reineke y el factor de competencia de copas, siendo ésta más satisfactorio para los propósitos de aplicación.

Para la definición de la línea A o límite de máxima densidad, Vega (1995), utilizó el índice de densidad de rodales de Reineke, generando una guía de densidad para *P. pseudostrobus* Lindl. Con datos de los municipios de Iturbe, Villa de Santiago y Zaragoza, Nuevo León; y para delimitar los rodales de baja densidad localizados cerca de la línea B, utilizó el factor de competencia de copas; en el Norte de México, en San Dimas Durango existen guías de densidad para, *P. cooperi*, esta especie en particular requiere de mayor espacio para su crecimiento, en comparación a otras especies (Márquez y Álvarez, 1995),

En la región de Huayacocotla, Veracruz, Monroy (1997), evaluó el crecimiento y productividad de *P. patula* a través del índice de densidad de Reineke; los diagramas auxiliares de manejo generados ayudaron a definir el comportamiento de las variables área basal/ha, diámetro medio cuadrático y número de árboles por hectárea; así mismo en el estado de Nuevo León se han integrado para *P. pseudostrobus* (Aguirre, 1994) y en Chihuahua para *P. arizonica engelmn* (Fernández, 1999).

En el cerro Potosí, municipio de Galeana, Nuevo León, Vargas (1999) determinó una norma de manejo de densidad, representada en una guía de densidad elaborada a partir del índice de densidad de rodales de Reineke y el factor de competencia de copas; ésta permitió especificar las condiciones de deficiencia, optimalidad y exceso del área basal y número de área por hectárea para diferentes índices de densidad de Reineke.

Para *P. montezumae* en Hidalgo también existen guías para el manejo de la densidad (Rodríguez et al., 2009). Para rodales de *P. teocote* en Hidalgo las guías construidas son un soporte en la planificación para diferentes opciones de manejo de densidad ya que se definen los límites de variación natural de densidad de la especie a la vez que muestra la capacidad explicativa y predictiva para el manejo forestal (Hernández et al., 2013), así mismo, en la región de Zacualtipán existen

guías de densidad para *P. patula* donde se sugiere una intensidad de aclareo fuerte (50%) en arbolado vivo en cada intervención (Santiago et al., 2013).

Todos éstos han confirmado que existe una relación estrecha entre el tamaño de los individuos seleccionados y el número de ellos por unidad de superficie en diferentes situaciones competitivas.

Las guías de densidad son modelos, que grafican la relación entre la producción y la densidad de los rodales (Centeno, 2013). Estos, se han basado en el desarrollo natural del arbolado, lo cual refleja la relación entre el tamaño, la densidad, la competencia y la ocupación del sitio (Navarro et al., 2010; Deán & Baldwin 1993; Hernández et al., 2013; Vacchiano et al., 2008). Por lo tanto, al ser representaciones graficas permiten la planificación de aclareos mediante la definición de los límites superior e inferior de la ocupación de un sitio de un rodal (Navarro et al., 2011).

Sin embargo, las guías de densidad se pueden usar con varios objetivos como minimizar la ventana temporal para alcanzar criterios específicos de operatividad (Newton y Weetman, 1994), controlar el desarrollo de arbustos durante las etapas tempranas de desarrollo del rodal (Smith, 1989), y optimizar el hábitat de vida silvestre en términos de la relación entre predador-presa (Sturtevant et al., 1996).

La interpretación biológica de la pendiente en la línea de auto-aclareo: auto-tolerancia, los parámetros y forma matemática de los modelos que reproducen mecanismos de crecimiento pueden ser analizados en términos de biología, además de estadísticas. La pendiente de Reineke es una medida de la capacidad competitiva intraespecífica de los árboles, llamada autotolerancia por analogía con la tolerancia del árbol (Zeide, 2005).

1.4. CONCEPTOS

1.4.1. Densidad

Se define como el grado de ocupación de un sitio o también por la intensidad de competencia entre los árboles. La densidad del rodal es el segundo factor de importancia para determinar la productividad de un sitio, en el primer lugar de importancia esta la calidad de sitio; la densidad es el componente principal que el silvicultor puede manejar e influir el establecimiento y desarrollo de las especies en período de regeneración, así como modificar la calidad de los troncos, la tasa de crecimiento en diámetro y la producción de volumen durante ese periodo de establecimiento (Monroy, 1997).

Curtis (1970) define densidad como el número de individuos, área basal o volumen por unidad de superficie. Gringrich (1970), señala que la densidad involucra el espaciamiento y la evaluación de la competencia. De acuerdo con Husch et al. (1972), la densidad de los rodales es una medida cuantitativa que refleja el grado de aglomeración de fustes dentro de un área determinada; mientras que Zepeda (1983) señala que la densidad es el grado de ocupación real, en un momento dado, del área de un sitio o lugar por árboles.

Becerra (1986), menciona que el concepto de densidad no es más que una medición que se refiere a la presencia de árboles sobre un área determinada por ejemplo número de árboles, área basal o volumen de los árboles por unidad de superficie.

Sin embargo, la densidad del rodal se refiere a “la densidad de existencias en términos de número de árboles, área basal, volumen, etc.,” por unidad de superficie. Monroy (1997) menciona que, la densidad relativa es la proporción de la densidad de un rodal para alcanzar un objetivo de manejo, aplicado a una unidad de superficie. En términos cualitativos se expresa como subpoblado, completamente poblado y sobrepoblado (Clutter *et al.*, 1983). Zepeda (1984), señala que la densidad ocupa un papel importante al describir dasométricamente a los rodales, ya que es el

indicar inmediato del grado en el que los árboles ocupan realmente en un tiempo dado, el área de un lugar representando así la estructura de los rodales.

La significación de la densidad se manifiesta sobre el crecimiento del rodal y, se basa en el postulado de que entre más amplio sea el espacio de crecimiento del árbol, más rápido será su crecimiento. El espacio de crecimiento es el factor que controla la producción de los árboles y la competencia inicia cuando el espacio disponible en el rodal, sea igual al espacio que requieren todos los árboles para crecer sin dificultad, comparado éste, con aquellos árboles que crecieron aislados (Vargas, 1999).

La competencia entre árboles afecta el crecimiento en diámetro, sobre todo en especies de rápido crecimiento, generalmente el diámetro medio del rodal es mayor a bajas densidades de plantación y menor a densidades altas aumentando en ambos casos según aumente la edad, es decir, es necesario manipular densidades para producir un crecimiento en diámetro máximo a través del desarrollo del rodal.

1.4.2. Densidad comparativa o relativa

Estos términos describen la elección de una densidad promedio que se define como la densidad estándar, en base a ésta se compara la densidad real de un rodal, para determinar un porcentaje o grado de densidad.

1.4.3. Espacio de crecimiento

Superficie ocupada por cada rodal dentro de un rodal determinado que puede ser expresada en función de la distancia entre los individuos, del área horizontal de la copa o de la extensión de raíces. El crecimiento de los árboles en un área está determinado por la cantidad, tipo y distribución de los mismos, variables éstas sobre las que las decisiones del forestal tienen un carácter determinante. La cantidad, tipo y distribución de los árboles determinan la densidad de los rodales, definida por el

grado de utilización de un sitio por árboles o también por la intensidad de la competencia entre éstos (Aguirre, 1997; Davis y Johnson, 1987, citado por Vargas, 1999).

La importancia en el crecimiento de altura radica en la competencia y sobrevivencia de los árboles, sin embargo, esta variable no es fuertemente afectada, por la manipulación de la densidad del rodal, no obstante, la altura promedio puede tener una influencia al aplicar aclareos en etapas iniciales, pero de manera mínima en los árboles dominantes y codominantes. El diámetro se incrementa en rodales con poca densidad y disminuye en altas densidades. A una edad determinada existe un límite de densidad mínima del rodal, a partir del cual no ocurre mayor crecimiento en diámetro. A niveles de baja densidad este límite está representado por árboles que crecen libres de competencia (Monroy, 1997; Vargas, 1999).

1.4.4. Población normal

En teoría, es donde se desarrolla el máximo incremento en volumen que se puede obtener en un sitio. La copa de los árboles cubre todo, no deja pasar la luz y cada copa se complementa con un sistema radicular que utiliza completamente el suelo.

1.4.5. Índice de densidad

Es una medida de la densidad generalmente basada en los componentes: número de árboles por unidad de área y diámetro medio.

1.4.6. Número de árboles por unidad de superficie

Esta medida de densidad se utiliza normalmente para rodales coetáneos sin intervención e incoetáneos y se expresa a través del número de árboles por hectárea, generalmente resulta ser una estimación práctica de la densidad. Una vez definidas las clases de diámetro normal se realiza la determinación de la frecuencia por clase y unidad de superficie. Consiste en llevar a hectárea el número de árboles medidos por clase de diámetro normal en la parcela.

1.4.7. Área basal por unidad de superficie

Es la acumulación de la sección transversal de todos los fustes por hectárea de los árboles a 1.3 m. Esta medida se usa para estimar la densidad del rodal, además, se considera un indicador de la competencia cuando se desconoce la historia del rodal. Del área basal y el número de árboles por unidad de superficie es directamente deducible el diámetro cuadrático medio. Las dos expresiones área basal y diámetro medio cuadrático son equivalentes y se utilizan como índices de densidad (Husch, 1993). Para quienes tienen suficiente experiencia en terreno, el área basal es una medida directa de la densidad, para un sitio y edad dada.

Cuando no se tiene se puede usar su equivalente, diámetro medio cuadrático y número de árboles por hectárea ya que permite ilustrar la densidad del rodal como una agregación de N árboles en la superficie a un diámetro normal (a 1.3 m) promedio (Martínez y Quiñones, 2015).

1.5. MÉTODOS PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DEL RODAL

A través del tiempo se han desarrollado metodologías tratando de explicar y dar a conocer los valores que representan los estados de desarrollo del bosque. La más conocida en función al tamaño-densidad es la “Ley de auto-aclareo” definida por (Reineke, 1933), ésta refiere una relación intraespecífica de tamaño-densidad de

rodales coetáneos no intervenidos y en crecimiento activo. O bien, que analiza la mortalidad por competencia extrema en poblaciones regulares (Chauchard et al. 1995).

Cuando existe una serie de escenarios optativos que dependen de la manipulación de la densidad, es esencial, desde el punto de vista de la toma de decisiones bien fundamentadas, ser capaz de expresar con precisión la densidad de un rodal. Dada la importancia de la evaluación precisa de la densidad, se han propuesto varios métodos para este efecto; así pues, los métodos de cuantificación son muy diversos; sin embargo, todavía no se ha llegado a un acuerdo en lo relativo a cuál es la forma más confiable para describirla (Daniel *et al.*, 1982).

De acuerdo con Zepeda (1984), un índice de densidad es un indicador cualquiera del grado de ocupación del área de un sitio por árboles. Al mismo tiempo para que la ocupación del área de un bosque sea eficiente, existe una densidad óptima o un rango de ella, para cada etapa de desarrollo de la masa (Hawley y Smith, 1972).

Daniel *et al.* (1982) presentan una clasificación de los diversos métodos para evaluar la densidad de un rodal:

- método ocular,
- tabla de rendimiento normal,
- índice de densidad de Reineke,
- tabla de rendimiento de Bruce,
- competencia de copas,
- porcentaje de altura,
- método de D más,
- método de las D veces,
- espacio de crecimiento,
- relación árbol/área y,
- método de incremento en volumen de Stage.

En contraste, Becerra (1986), menciona los siguientes métodos para determinar la densidad:

- Índice ocular,

- Tablas de rendimiento normal,
- Método de D más,
- Método de D veces,
- Densidad puntual de Spurr,
- Ley de autoaclareo,
- Índice de densidades de rodales de Reineke,
- Relación área árbol,
- Factor de competencia de copas y,
- Guía de densidad.

Sin embargo, se han diseñado y propuesto diferentes métodos de estimar en forma cuantitativa la densidad de un rodal y así compararla con la densidad que implique la norma de manejo para el cumplimiento de un determinado objetivo (Fierros, 1993). También presentó en forma breve los índices más usados y que sirven de base para la construcción de guías y diagramas de manejo de densidad, citados a continuación:

- a. Basados en el número de árboles:
 - Índice de rodales de Reineke
 - Ley de autoaclareo
- b. Basados en el diámetro:
 - Relación área- árbol
 - Factor de competencias de copas
- c. Basados en el volumen:
 - Tablas de rendimiento normal

Becerra (1985), señala que son varios los métodos diseñados para cuantificar la densidad y los reporta en forma clasificada de acuerdo con las variables que se utilizan.

Cada método tiene un enfoque sobre la medición de la densidad del rodal y cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas, sin embargo, los métodos que se han estandarizado y logrado una mayor aplicación en especies de coníferas y que por lo mismo presentan mayor difusión son:

- i. Índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR) (Reineke, 1933).

- ii. Relación área-árbol (RAA) (Chisman y Schumacher, 1940).
- iii. Factor de competencia de árbol (FCC) (Krajicet *et al.*, 1981)

Zepeda (1984) y Aguirre (1996), señalan que en general los bosques naturales no aprovechados o los aprovechados en forma insuficiente, presentan densidades excesivas en las que la productividad potencial del lugar, se distribuye entre tantos individuos, que ninguno de ellos alcanza un crecimiento óptimo o presentan densidades insuficientes propiciando espacios libres e improductivos con árboles ramificados.

A continuación se describen algunos de los métodos antes mencionados:

1.5.1.1. Índice de densidad del Rodal o Índice de Reineke

Este indicador de la densidad fue sugerido por L.H. Reineke en 1933 y puede ser una herramienta para regular la densidad y ajustarla a metas previamente establecidas en el manejo intensivo del rodal. El postulado principal es el de que cualquier rodal puro, coetáneo y bien poblado (de densidad completa) tiene aproximadamente el mismo número de árboles por unidad de superficie que otro rodal puro, coetáneo y bien poblado, de la misma especie y diámetro cuadrático medio, independientemente de la edad y la calidad de sitio (Daniel *etal.*, 1982).

El índice de densidad del rodal es conocido como índice de Reineke a partir de los trabajos de este autor sobre varias especies norteamericanas (REINEKE, 1933). Este índice se obtiene a partir de una relación alométrica que representa la evolución del número de pies por hectáreas como función del diámetro medio cuadrático (Bravo, Montero y del Río, 1997) véase en la ecuación 1.

Está fundado en la relación densidad-tamaño entre el número de árboles por hectárea y su diámetro medio cuadrático (D_q) expresado en la escala logarítmica base diez (Martínez y Quiñones, 2015).

Tiene como supuesto: para una especie dada, el número máximo de árboles que puede sostener un rodal coetáneo, plenamente poblado, está correlacionado

negativamente con su diámetro cuadrático medio y la curva que representa esta relación asume la forma de línea recta cuando se traza sobre papel logarítmico.

Existen varios procedimientos basados en la relación número de árboles por hectárea y el diámetro del árbol medio. El más común de estos índices es el desarrollado por Reineke (1933). Esta medida de densidad se puede utilizar para bosques puros, coetáneos y regulares tanto para coníferas como latifoliadas.

El IDR expresa en forma matemática la relación entre el tamaño de los árboles y la densidad del rodal, a través de la siguiente ecuación (McCarter y Long, 1986):

$$N = \beta_0 * Dq^{-\beta_1} \quad (1)$$

Donde:

N es el número de árboles por hectárea,

Dq es el diámetro medio cuadrático y,

β_0 y β_1 son los parámetros.

Hay evidencia que el valor de la pendiente de la curva puede variar entre especies, por lo tanto, los trabajos basados en este índice deben analizar estadísticamente si el valor de la pendiente encontrado para una especie en particular difiere significativamente del valor teórico dado por Reineke (Zeide 1987, Williams 1996). Reineke (1933) trabajando con datos procedentes de rodales que ocupaban totalmente la estación (stocked stands) encontró una relación lineal sobre una escala logarítmica (Bravo, Montero y del Río, 1997):

$$\text{Log}N = \text{Log}\beta_0 + \beta_1 * \text{Log}Dq \quad (2)$$

La pendiente de esta recta resultó ser igual a -1,605 (calculada como la media de 12 de las 14 especies con las que trabajaba Reineke) mientras que el término independiente variaba con la especie. Reineke definió el índice de densidad del Rodal basándose en un diámetro de referencia de 10 pulgadas (25,4 cm) que habitualmente es sustituido. De este modo el índice se expresa como el número de pies de diámetro igual al de referencia equivalentes a los árboles presentes en un rodal de diámetro medio cuadrático determinado (Bravo, Montero y del Río, 1997).

Así, por definición:

$$IDRR = N * \left(\frac{D_0}{D_q} \right) * \beta_1 \quad (3)$$

Donde IDRR es el índice de densidad del rodal de Reineke y D_0 es el diámetro de referencia (25 cm). El índice de densidad del rodal expresa en forma matemática la relación existente entre el tamaño de los árboles y la densidad del rodal. Esta relación ha sido desde 1933 para evaluar el estado de competencia de los árboles así como el criterio para la toma de decisiones sobre necesidades de aclareo en plantaciones forestales y rodales naturales (Arias, 2004).

El índice se construye para cada rodal a partir de una muestra de observaciones en el tiempo (idealmente independientes), o unidades muestrales fijas en el tiempo (con el consiguiente problema de autocorrelación) y/o con una mezcla de ambas (unidades muestrales permanentes y temporales). Se ajusta una recta de la forma descrita y se genera una familia de curvas de densidad utilizando como índice (100%) el valor promedio y el resto en forma paralela sobre y bajo la recta promedio. De esta manera para ese rodal, es posible calcular su nivel o índice de densidad de rodal normal, sobredensos y subdensos (Corvalán y Hernández, 2006).

Para muestras del rodal se observa el par (log DAP-Log N) y se define su índice de densidad como aquella recta más cercana. Otra manera de utilizar este índice es definir un diámetro medio cuadrático clave (fijo) y se define la densidad normal como

el número de árboles por hectárea esperado en la recta, así todas las muestras que estén cerca de esa recta promedio recibirán como índice de densidad ese valor (Corvalán y Hernández, 2006).

1.5.1.2. Modelo de autoaclareo de Yoda

Otra medida usada para evaluar densidad es el índice de Yoda (IDY) basado en la ley del auto-aclareo (relación máxima densidad-tamaño) o ley de los 3/2. En escala logarítmica natural, la relación entre el número de plantas por unidad de área y su biomasa promedio debería mantener una relación lineal con una pendiente universal de -1.5 (Yoda et al., 1963; Pretzsch, 2009).

$$\ln(VP) = \alpha - \beta * \ln(NA) + \epsilon \quad (4)$$

Donde:

NA es el número de árboles por hectárea,

Dq es el diámetro medio cuadrático por hectárea,

Vp es el volumen promedio por árbol,

Ln indica el logaritmo natural,

α y β son los parámetros a estimar y,

ϵ es el error en el modelo.

1.5.1.3. Relación árbol/área (RAA)

Para determinar esta relación se requiere hacer un censo detallado para los rodales densos y es necesario conocer las dimensiones de cada árbol en cada

parcela muestreada. Por esta razón a sido poco utilizada dado que no representa ventaja alguna sobre las medidas simples de densidad del rodal. Se basa en el supuesto de que el área del terreno A ocupada por un árbol determinado de diámetro normal d se puede expresar por la relación siguiente (Chisman y Schumacher, 1940):

$$A = \beta_0 + \beta_1 * d + \beta_2 * d^2 \quad (5)$$

Donde:

d = diámetro normal (cm)

β_i = coeficientes de regresión

entonces, el área total del espacio de crecimiento distribuido entre todos los árboles existentes en una parcela, puede obtenerse con la suma de las áreas asignadas a los árboles en forma individual, es decir, sumando todos los árboles existentes en el área considerada (Husch *et al.*, 1972 citado por Vargas, 1999).

De aquí la importancia de medir estas variables de tal forma que posibilite la clasificación y cuantificación de las especies arbóreas establecidas, así como identificar las áreas de producción, conservación y de restauración para encauzar las posibles propuestas de manejo agroforestal y planear las acciones agrosilvícolas futuras en tiempo y espacio de la masa forestal.

1.5.1.4. Factor de competencia de copas (FCC)

Supone que árboles que crecen aislados (sin competencia) pueden expresar el diámetro de su copa como una función lineal de su diámetro normal. De esta forma, su área de copa será proporcional al cuadrado de esta función. Si se supone que la máxima área de copa para árboles, es proporcional al cuadrado de su función de su

diámetro normal, la suma de todas las áreas de copas de los distintos árboles en la superficie será igual a la suma de todas las máximas áreas de copa de todos los árboles (que dependen de su diámetro normal) y su factor de competencia de copa será ese valor dividido por la superficie que los contiene (Corvalán, 1985 citado por Corvalán y Hernández, 2006).

La función se construye con una muestra de árboles de distinto tamaño, creciendo en condiciones de aislamiento, es decir, utiliza la relación existente entre la copa de un árbol y su diámetro; el índice se basa en la proyección horizontal del área de copa de árboles de un diámetro determinado y su relación con el área máxima de copa de árboles del mismo diámetro pero que han crecido en espacios abiertos, en otras palabras sin ninguna interferencia. Este índice de densidad se supone independiente de la edad, sitio y estructura de los rodales (Krajicek *et al.*, 1961; Quiñones, 2000).

Este método se diseñó para adoptar información acerca de la máxima cantidad de espacio disponible que puede utilizar un árbol y acerca del mínimo necesario para que el árbol pueda sostener su sitio dentro del rodal (Daniel *et al.*, 1982).

La relación fundamental entre el diámetro de copa (dc), y el diámetro normal (dn), de árboles que han crecido sin interferencia, se asume de la siguiente forma:

$$dc = \beta_0 + \beta_1^d \quad (6)$$

si dc se expresa en metros, el área de copa (ac) estará dada por:

$$ac = (\pi/4)(dc) \quad (7)$$

Por lo tanto, el área máxima de copa (amc) es:

$$amc = \frac{\left(\frac{\pi}{4}\right) [(\beta_0 + \beta_1^d)]^2}{100} \quad (8)$$

Finalmente queda:

$$FCC = \frac{\sum_{i=1}^n amc}{a} \quad (9)$$

Donde:

Ac es el área de copa (m²)

Amc es el área máxima de copa (m²)

A es el área ocupada por el rodal (m²)

FCC es igual al factor de competencia de copas

1.5.1.5. Tabla de productividad para rodales

Zepeda (1990) señala que los componentes de producción de rodales son:

- Acreción: cantidad de tejido lignocelulósico acumulado en los árboles de un rodal que permanecen vivos durante el intervalo entre dos mediciones sucesivas.
- Incorporación: material agregado a categorías diamétricas iguales o superiores al diámetro mínimo considerado como inventariable para un rodal, durante un cierto tiempo.
- Mortalidad: material descontado de un rodal, producto de los árboles que mueren en el transcurso de cierto tiempo.

Así la productividad esta dada por:

Producción bruta= acreción + incorporación + mortalidad

Producción neta: acreción + incorporación

Finalmente la producción representa la madera inventariable producida por un sitio (bruta o neta), el rendimiento es el producto útil obtenido de acuerdo al o a los objetivos de manejo considerado (s). Por lo que el rendimiento de un rodal puede ser menor o igual a su producción (Zepeda, 1990 citado por Monroy, 1997).

Zepeda (1990), propuso una clasificación de modelos de crecimiento e incremento, que utiliza como criterio básico de agrupación la estructura de los rodales. En esta clasificación se dividen las tablas tradicionales de rendimiento y de producción, por la razón de su estimación por métodos gráficos, monográficos o analíticos; además de que los procedimientos analíticos de construcción pueden ubicarse en la categoría de modelos empíricos.

1.5.1.6. Guías de densidad

Gingrich (1967), las define como diagramas que comparan el número de árboles, área basal y diámetro cuadrático de rodales específicos con los mismo atributos de rodales de densidad máxima (Monroy, 1997). Los diagramas o guías de densidad son una representación de ésta en los rodales con determinado diámetro cuadrático en función a la relación que existe entre las variables dasométricas, para un rango amplio de densidades de población, Zepeda y Villareal (1987).

Las guías de manejo de la densidad forestal constituyen una valiosa herramienta silvícola en la planeación y prescripción de tratamientos silvícolas, es decir, son modelos que grafican la relación entre la producción y la densidad que existe en los rodales (Centeno, 2013). Estas, se han basado en el desarrollo natural del arbolado, lo cual refleja la relación entre el tamaño, la densidad, la competencia y la ocupación del sitio (Martínez y Quiñones, 2015).

Zepeda y Villareal (1987), señalan que una guía de densidad sirve para evaluar el grado de densidad de un cierto rodal, preponderantemente homogéneo y puro, con base en las variables dasométricas que lo caracterizan: diámetro cuadrático promedio y número de árboles por unidad de área.

En este mismo contexto, la secuencia para la construcción de una guía de densidad puede resumirse en la obtención de los siguientes elementos: desarrollo de los niveles de densidad relativa, desarrollo de un nivel de referencia, adopción de un formato de la guía de densidad, presentación esquematizada de la guía de densidad y el uso de las guías.

Becerra (1986) citado por Monroy (1997), menciona que las guías permiten determinar el porcentaje de población con base en el diámetro medio cuadrático, el número de árboles y el área basal de tal manera que un rodal con densidad de un determinado número de metros cuadrados por hectárea de área basal, puede clasificarse como anhelado.

Aguirre (1997) citado por Vargas (1999), señala que las guías de densidad constituyen una importante herramienta para la caracterización de éste parámetro dasométrico, tanto para la planeación de regímenes de tratamiento silvícola en rodales bajo manejo, como para el monitoreo de la condición de áreas boscosas a través del tiempo. En el marco de la toma de decisiones, las guías permiten seleccionar la alternativa óptima de manejo de acuerdo a la densidad y los objetivos propuestos, lo que representa una contribución a la sustentabilidad y mejoramiento de los recursos forestales maderables.

Estimación de la densidad en *Pinus pseudostrobus* en dos ejidos dentro del Área Natural Protegida del Nevado de Toluca, Estado de México

2.1. Resumen

Los parámetros obtenidos en el modelo de índice de densidad de rodal y el factor de competencia de copas, se ajustaron bien ya que para el índice de densidad de rodales de Reineke se obtuvo un coeficiente de determinación del 91%, la densidad estimada resulta de la ecuación $N = \beta_0 * Dq^{-\beta_1}$, a través de esta ecuación se obtuvo un valor de la pendiente $\beta_1 = -1.667$ y un valor de $\beta_0=170600$, con el valor del diámetro cuadrático medio de referencia (25cm) se obtuvo un total de 797 árboles por hectárea en el Ejido Mesón Viejo, y para el Ejido Agua Bendita se obtuvo un valor de la pendiente de $\beta_1 = -1.4399$ y un valor de $\beta_0=60895.8059$, teniendo un total de 590 árboles por hectárea de acuerdo a los valores obtenidos para cada uno de los parámetros calculados; y para el factor de competencia de copas (FCC) se obtuvo un 98% de variabilidad en la relación del diámetro de copa y el diámetro normal.

Palabras clave: parámetros, densidad, índice, pendiente.

Tesis: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Alfonso Ávila Valdivia

Director de Tesis: Dr. Francisco J Zamudio Sánchez

Estimation of density in *Pinus pseudostrobus* in two ejidos within the Nevado de Toluca Natural Protected Area, State of Mexico

2.2. Abstract

The parameters obtained in the stand density index model and the crown competition factor were well adjusted since for the density index of Reineke stands a coefficient of determination of 91% was obtained, the estimated density results from the equation $N = \beta_0 * Dq^{-\beta_1}$, through this equation we obtained a value of the slope $\beta_1 = -1.667$ and a value of $\beta_0 = 170600$, with the value of the mean square reference diameter (25cm) we obtained a total of 797 trees per hectare in Ejido Mesón Viejo, and for the Agua Bendita Ejido a slope value of $\beta_1 = -1.4399$ and a value of $\beta_0 = 60895.8059$ was obtained, having a total of 590 trees per hectare according to the values obtained for each of the calculated parameters; and for the cup competition factor (FCC) a 98% variability in the ratio of cup diameter and normal diameter was obtained.

Keywords: parameters, density, index, slope.

Thesis: Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Alfonso Ávila Valdivia
Advisor: Dr. Francisco J Zamudio Sanchez

2.3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se realizó en el Ejido “Mesón Viejo Dotación”, municipio de Temascaltepec, y en el Ejido Agua Bendita, Municipio de Amanalco, Estado de México, que se encuentran ubicados en el “Área Natural de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, con coordenadas -99.880833 de longitud y 19.170278 de latitud y, -99.945000 de longitud y 19.273333 de latitud, respectivamente. La topografía del lugar se corresponde con la mostrada en el eje neovolcánico transversal con presencia montañosa, de lomeríos y mesetas, cuyas altitudes varían de 2823 msnm a 3189 msnm en Ejido Mesón Viejo y, la altura sobre el nivel del mar oscila entre los 2,600 y los 3,360 m en Agua Bendita.

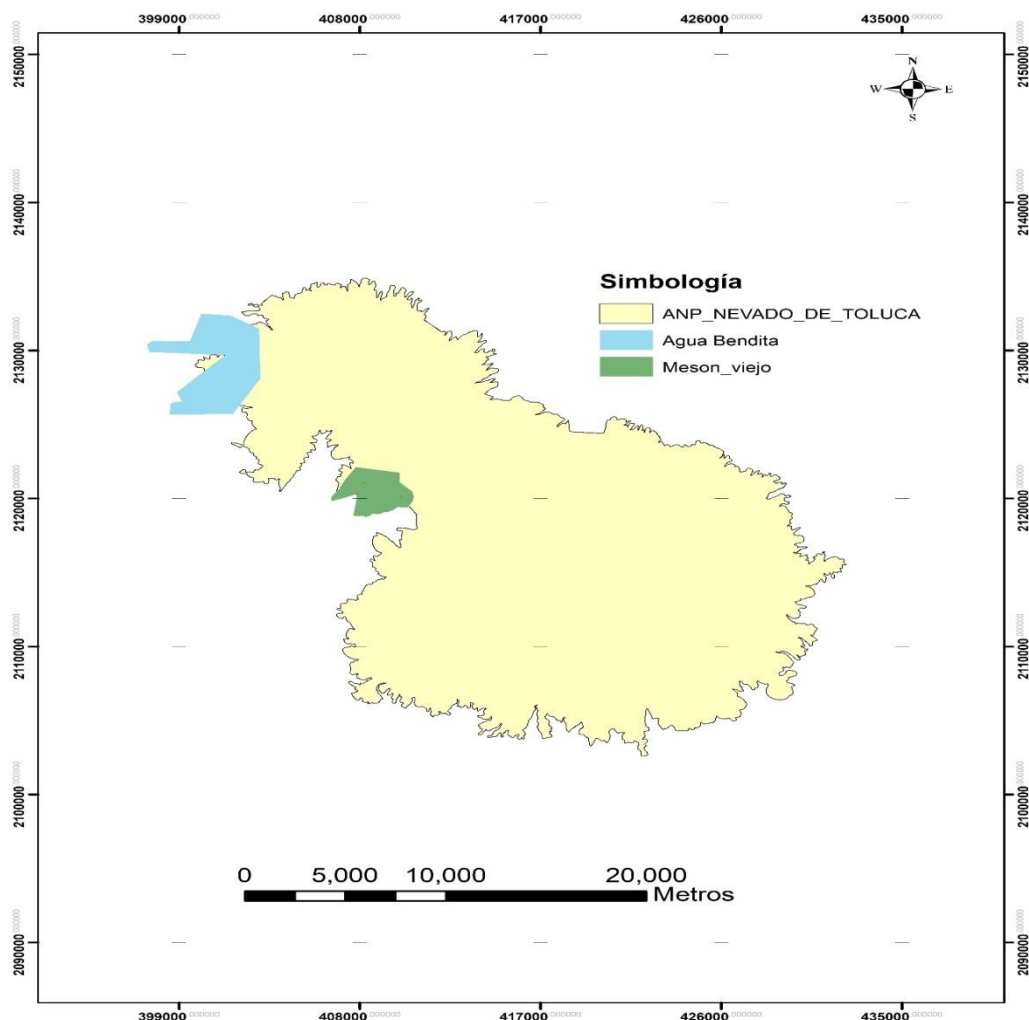


Figura 1. Localización del área de estudio

2.3.1. Clima

2.3.1.1. Clima de Ejido Mesón Viejo

De conformidad con la carta estatal de climas del INEGI (2001) el Ejido “Mesón Viejo Dotación”, presenta dos condiciones climáticas. La primera, muestra un clima tipo C(E)(w₂)(w), que se corresponde con la parte alta de la zona montañosa, que se caracteriza por su clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano, como temporada de mayor humedad. La temperatura media anual varía de 5° a 12°C. La precipitación total anual es mayor de 800 mm, la precipitación en el mes más seco es menor de 40 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor de 5.

La segunda, posee un clima tipo C(w₂)(w) que se presenta en la parte media de la zona montañosa, caracterizada por su clima templado subhúmedo con lluvias en verano, como periodo de mayor humedad. La temperatura media anual en la zona varía de 12° a 18°C. La precipitación total anual es mayor de 700 mm y el porcentaje de lluvia invernal menor de 5 mm.

2.3.1.2. Clima de Ejido Agua Bendita

Los climas predominantes en la zona en que se ubica el predio se identifican por las fórmulas C(E)(w₂)(w) y C(w₂)(w). Estos climas, de acuerdo con la clasificación de Köpen, modificada por Enriqueta García, se describen como *semifrío subhúmedo*: es el más húmedo de los semifríos, con lluvias en verano, una precipitación en el mes de más seco menor a 40 mm y un porcentaje de lluvia invernal menor a 5, precipitación media anual mayor de 800 mm y temperatura media anual entre 4 y 12°C. y un segundo clima *Templado subhúmedo* C(w₂)(w): es el más húmedo de los templados con lluvia en verano y porcentaje de lluvia invernal menor a 5, con precipitación media anual mayor de 800 mm, y temperatura media anual de 12 a 18°C.

2.3.2. Suelo

2.3.2.1. Suelos de Ejido Mesón Viejo

De conformidad con la carta estatal edafológica del INEGI 2001, los principales tipos de suelos que existen en el Ejido “Mesón Viejo Dotación”, son los siguientes:

- Th: andosol húmico: Suelos derivados de la intemperización de cenizas volcánicas, son muy ligeros (densidad de masa menor de 0.85), con una alta capacidad de retención de agua y fijación de fósforo, debido al alofano.
- To: andosol ócrico: Presenta un horizonte A ócrico de color claro, pobre en materia orgánica, espesor delgado y contenido de nutrientes generalmente bajo debido a la poca acumulación de materia orgánica en la superficie.
- Hh: feozem háplico: Se caracterizan por presentar un horizonte A mólico, suave, rico en materia orgánica (más de 1%) y saturación de base mayor de 50%, por lo tanto, el contenido de nutrientes (calcio, magnesio y potasio) es elevado. La formación de estos suelos es generada en gran medida por el intemperismo de las rocas de origen ígneo extrusivo que son abundantes en la zona.

2.3.2.2. Suelos de Ejido Agua Bendita

De conformidad con la carta estatal edafológica del INEGI 2001, los principales tipos de suelos que existen en el Ejido “Mesón Viejo Dotación”, son los siguientes:

- (Th) Andosol húmico: Suelos derivados de cenizas volcánicas, muy ligeros y con alta capacidad de retención de agua; tienen una capa superficial oscura o negra, rica en materia orgánica, pero muy ácida y pobre en nutrientes.

- (To) Andosol ócrico: Al igual que el anterior es un suelo derivado de cenizas volcánicas, muy ligero y con alta capacidad de retención de agua; presenta una capa superficial clara, pobre en nutrientes.
- (Hh) Feozem háplico: Se caracteriza principalmente por su capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y nutrientes.
- (2L): La textura es clasificada como media, fase lítica (lecho rocoso entre 10 y 50 cm)

Los suelos de la subprovincia fisiográfica en que se ubica el predio son de origen coluvio-aluvial y residual; su fertilidad es de moderada a alta, sin embargo, debido a la zona en que se ubican, el uso potencial es el forestal; por otra parte, son relativamente susceptibles a la erosión, especialmente si se encuentran desprovistos de cubierta vegetal.

2.3.3. Vegetación

2.3.3.1. Vegetación de Ejido Mesón Viejo

La vegetación presente en la zona está integrada por bosque conformado por masas puras de pino de diversas especies (*Pinus montezumae*, *P. patula*, *P. pseudostrobus* y *Pinus teocote*), localizado en la parte media del predio. También, se pueden observar la presencia de bosque de pino y oyamel conformado por masas mezcladas de pino (*Pinus montezumae*, *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*) con oyamel (*Abies religiosa*), con predominancia del pino; bosque de pino y encino integrado por masas mezcladas de pino (*Pinus montezumae*, *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*) con encino (*Quercus acutifolia*, *Quercus alveolata*, *Quercus arguta*, *Quercus conglomerata*, *Quercus conspersa* y *Quercus laurina*), con predominancia del pino; bosque de pino y otras hojosas compuesto por masas mezcladas de pino (*Pinus montezumae*, *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*) con diversas latifoliadas como *Alnus arguta*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleja cordata*, *Cletra mexicana*, *Garrya laurifolia*, *Phoebe ehrenbergii*, *Prunus*

avium y *Salix cana*, con predominancia del pino; y finalmente, bosque de oyamel y pino constituido por masas mezcladas de oyamel (*Abies religiosa*) con pino (*Pinus montezumae*, *Pinus patula*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*), con predominancia de oyamel.

2.3.3.2. Vegetación de Ejido Agua Bendita

La región en que se ubica el predio bajo estudio, dentro del municipio de Amanalco, cuenta con la presencia de distintas comunidades vegetales, entre las que destacan los bosques de coníferas, representados por masas de pino (*Pinus spp.*) y oyamel (*Abies religiosa*), especies que pueden llegar a formar mezclas con latifoliadas como el encino (*Quercus spp.*) y el aile (*Alnus firmifolia*)

La vegetación que existe en el ejido Agua Bendita presenta como especies dominantes al pino y al oyamel, los cuales llegan a formar mezclas entre sí, así como con latifoliadas como el encino y el aile, entre otras.

2.3.3.3. *Pinus pseudostrobus* Lindl

Los pinos generalmente crecen en las regiones montañosas que van de los 1500 msnm y mayores a los 3000 msnm. El género *Pinus* casi siempre se encuentra asociado con otras especies de árboles como oyameles, encinos y cipreses, junto con los cuales forma los llamados bosques de coníferas que cubren alrededor de 17 millones de hectáreas del territorio nacional, lo que equivale al 34 % de la superficie arbolada del país. El desarrollo de éstos depende de la calidad del suelo y su humedad, de tal forma, que con suelos que muestren buena disposición y estén descubiertos de cualquier otra cobertura vegetal, suelen propagarse y predominar en las áreas montañosas donde el viento es fuerte. El clima de este tipo de bosque se corresponde con clima templado húmedo, con áreas de suelo seco y arenoso (Saéñz, Muñoz y Rueda, 2011).

3.1.3.1.1. Taxonomía

Esta especie es de las que presentan mayor variación geográfica en la República Mexicana y parte de Centroamérica; se cree posible la cruce con las especies del grupo Montezumae. Tiene un enorme parecido con *P. maximinoi* y *P. douglasiana*, sobre todo en sus fascículos y conos, además, se les ha encontrado asociados con mucha frecuencia (Martínez, 1948). Árbol siempre verde de 25 a 40 m de altura, de 40 a 80 cm en diámetro normal, fuste recto, presenta buena poda natural del 30 al 50% de su altura total libre de ramas, moderadamente exigente a la luz (Martínez, 1948; CATIE, 1997 y Perry, 1991).

3.1.3.1.2. Distribución y hábitat

Se reporta como originaria de México, Guatemala y Honduras; en general en latitudes que van de 14° N a 26° N. En la República Mexicana su distribución queda comprendida entre los paralelos 17° 15' a 29° 25' de latitud N y los meridianos 92° 05' a 108° 35' de longitud W. Se localiza en la Sierra Madre Oriental, Eje Neovolcánico y en la Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y parte de la Sierra Madre Occidental. Se ha registrado en las siguientes entidades federativas: Jalisco, Colima, Estado de México, Hidalgo, Distrito Federal, Puebla, Guerrero, Morelos, Oaxaca, Coahuila, Chihuahua, Guanajuato, Chiapas, Puebla, Querétaro, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas, Veracruz y Tlaxcala (Martínez, 1948; Eguiluz, 1978; Perry, 1991; CATIE, 1997 y SEMARNAP, 2006).

2.4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en los inventarios forestales de nuestro país ha evolucionado debido a cambios en sus objetivos, la disponibilidad de nuevas herramientas tecnológicas, y la necesidad de contar con información para tomar decisiones encaminadas al desarrollo forestal sustentable. Los Inventarios

Forestales en sus inicios fueron documentos con gran cantidad de cuadros y pocos mapas, pero en la actualidad los mapas y la información georreferenciada son uno de los elementos principales (Kleinn, 2002).

Con base en los elementos anteriores, la metodología de trabajo del inventario forestal del Ejido “Mesón Viejo Dotación”, así como para el Ejido Agua Bendita, ubicados en el “Área Natural de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca” se representa de acuerdo con cuatro grandes secciones: planeación, muestreo de campo, análisis de la información y generación y análisis de resultados.

2.4.1. Planeación

Agrupar las actividades enfocadas a definir los mecanismos para lograr los objetivos del inventario. En ellas se incluye la determinación del tamaño de muestra, la capacitación del personal encargado del levantamiento de la información en campo, elaboración de instrumentos para la toma de información, elaboración de la plantilla de captura, asignación del trabajo y la definición de rutas. Estas actividades se describen brevemente a continuación.

2.4.2. Determinación del tamaño de muestra

El diseño de muestreo utilizado siguió las especificaciones técnicas de los Términos de Referencia para el INFyS, con adecuaciones ajustadas a las necesidades de un inventario de carácter estatal. Considerando la superficie a inventariar por zona, podemos obtener el tamaño de muestra a través de la siguiente fórmula.

$$n = \frac{1}{\frac{E^2}{t^2 pq} + \frac{1}{N}} \quad (10)$$

Donde:

n = número de unidades muestrales que debe contener la muestra.

E = error de estimación (0.05)

P = Variabilidad extrema (0.5)

$q = 1 - P$

N = Tamaño de la población en unidades muestrales

t = El valor "T de Student" con un valor de $\alpha = 0.05$

Dentro de la clasificación dada por el Inventario Nacional Forestal (INFyS), este trabajo es un proyecto regional, en el cual se requiere de una confiabilidad del 95% y un error de muestreo máximo del 10%, se plantea de manera inicial, máxima variabilidad (p y $q = 0.5$) y $t = 1.96$.

Con este procedimiento para determinar las densidades en las que se desarrollan los individuos elegidos se trabajó con 214 sitios de muestreo en Ejido Mesón Viejo y 171 sitios en Ejido Agua Bendita, con dimensiones de 1/10 hectárea, es decir, sitios circulares de 1000 m². En el Ejido Mesón Viejo los sitios se seleccionaron con ayuda del catastro predial con base en las ortofotos digitales No. 279 y 280 elaborados por la Subdirección de Estudios y Consulta del Territorio Estatal (2010) y con escala 1:20,000; así como la ortofoto No. 89 a escala 1:20,000, del año 2000, la cual fue elaborada por el IGECM a partir de las fotografías aéreas a escala 1:37,500 correspondientes al vuelo del 2000; asimismo, para el Ejido Agua Bendita, las cartas topográficas clave E14A37 y E14A47, a escala 1:50,000, editadas por el INEGI. En la elección de los sitios escogidos se procuró integrar todas las exposiciones, así como la totalidad de las clases diamétricas localizadas en la zona de estudio.

2.4.3. Diseño de muestreo

Para la obtención de datos se aplicó un muestreo de tipo sistemático al que se le determinó un margen de error del 8%. Durante la fase de muestreo de zona se realizaron recorridos de campo basados en el manejo de ortofotos digitales de los rodales a estudiar, mismos que se determinó fueran de diferentes dimensiones. Se levantaron sitios de 1000m² y a partir de éstos se abarcaron todas las categorías diamétricas.

2.4.4. Obtención de datos en campo

Se tomaron en cuenta todos los sitios boscosos que estaban dentro del ejido “Mesón Viejo Dotación”; asimismo, se seleccionaron rodales que hubieran estado sin aprovechamiento durante los últimos 15 o 20 años. Las variables medidas en cada sitio fueron: diámetro normal, altura, y número de árboles existentes por ha-1. La información recopilada permitió caracterizar los siguientes aspectos de los ecosistemas forestales del ejido Mesón Viejo “Dotación”, y Ejido Agua Bendita:

- a. las condiciones del terreno (altitud, pendiente, profundidad y textura del suelo, erosión y fisiografía),
- b. la diversidad y riqueza de especies por estrato,
- c. las características de especies de flora,
- d. los aspectos dasométricos (nombre común, diámetro, altura total, altura comercial, y daños) y,
- e. el incremento en volumen de los árboles de coníferas y la frecuencia y vigor del repoblado.

La información anterior permitió obtener indicadores sobre el estado de los recursos forestales del predio en estudio; recabar las variables para la estimación de diámetro y altura, y así calcular el volumen en los diferentes rodales; determinar las

características cualitativas y cuantitativas de los recursos forestales y determinar la densidad al arbolado en pie.

El diseño del muestreo fue sistemático, para contar con elementos estadísticos que permitieran estimar la confiabilidad del inventario e intensificar el muestreo en las zonas con mayor dinámica de cambio y con las estructuras vegetativas más complejas. La vegetación arbórea se midió en el sitio de 1000 m² (Radio = 17.84 m), y se consideraron a todos aquellos individuos cuyo diámetro normal a la altura de 1.30 m sobre la superficie del suelo, tomado por arriba de la pendiente, fuera igual o mayor a 7.5 cm para incluirlos dentro de la categoría diamétrica de 10 cm.

Se elaboró una cobertura de puntos en el programa ArcGis y ésta se traslapó al archivo shape file del Ejido de Mesón Viejo "Dotación", se excluyeron los sitios que no cumplían con las especificaciones para el levantamiento de la información de campo (por ejemplo, áreas urbanas y áreas destinadas exclusivamente a la agricultura), con base en los términos de referencia del presente estudio. Se asignó un número consecutivo a cada rodal y se relacionó con sus respectivas coordenadas UTM.

2.5. METODOLOGÍA ESTADÍSTICA

La estimación de parámetros de interés (densidades, áreas basales, etcétera) se efectuó mediante los estimadores de razón estudiados en muestreo probabilístico, ver índice de Reineke (1933). En particular, se utilizaron las expresiones presentadas por Velasco et. al. (2003), las cuales son apropiadas para un diseño de muestreo sistemático, por conglomerados y estratificado; en este caso solamente se utilizó el muestreo sistemático. La confiabilidad establecida para las estimaciones es de 0.95 ($\alpha = 0.05$).

2.5.1. Estimación de la densidad

Fueron dos modelos matemáticos que se seleccionaron para la estimación de la densidad: Índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR) y el Factor de competencia de copas (FCC), estos modelos fueron la base para la construcción de la guía de densidad.

2.5.1.1. Índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR)

Del total del área del predio se seleccionaron las áreas con presencia boscosa de densidad completa, es decir, con los 214 sitios muestreados se generó el índice de densidad de rodales de Reineke, para el caso de Ejido Mesòn Viejo, las variables a medir fueron el número total de árboles por hectárea y el diámetro normal.

Para calcular la relación existente entre el número de árboles que hay por hectárea y el diámetro cuadrático medio de cada rodal se utilizó la ecuación 1. De esta manera se utilizó el diámetro de referencia (25 cm) para elaborar el diagrama de densidad de Reineke.

En base a ello también se pudo determinar el volumen por hectárea de acuerdo a una altura y a un diámetro cuadrático medio determinados.

2.5.1.2. Factor de competencia de copas (FCC)

Se tomaron 50 árboles en Ejido Mesón Viejo y 27 árboles en Ejido Agua Bendita de las mejores características fenotípicamente hablando (libres de competencia, plagas, enfermedades, daños de cualquier índole, así como un fuste recto), midiendo el diámetro normal y el diámetro de copa como las variables dasométricas a estudiar y de esta manera encontrar el valor de los parámetros, véase de la ecuación 6 a la 9.

2.5.2. Elaboración de diagrama de densidad

Para la elaboración del diagrama de densidad, se utilizaron datos de campo de los sitios temporales de muestreo en rodales asociados de *Pinus pseudostrobus* distribuidos en la mayor parte de las categorías diamétricas inventariables. En la Figura 1 se muestra la dispersión del total de los sitios muestreados, los cuales tienen categorías diamétricas superiores a 10 cm.

El modelo matemático seleccionado para caracterizar la densidad fue el índice de densidad de rodales de Reineke (IDRR).

Se calculó el diámetro cuadrático mediante la siguiente expresión:

$$Dq = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{AB}{NA}} \quad (11)$$

Donde:

AB: Área basal

NA: Número de árboles

2.6. RESULTADOS

Dentro de la clasificación dada por el Inventario Nacional Forestal (INFyS), este trabajo fue un proyecto regional, en el cual se requirió de una confiabilidad del 95% y un error de muestreo máximo del 10%, se planteó de manera inicial, máxima variabilidad (p y $q= 0.5$) y $t = 1.96$. Con este procedimiento, se definieron los 171 y 214 sitios de muestreo con superficie de 1000 m² en 27 y 50 rodales de carácter forestal dentro del predios en estudio.

Para saber lo que se iba a muestrear fue necesario conocer la superficie forestal de la región, así como el tipo de vegetación existente y el uso del suelo que está presente, y con ello sacar la variable de interés, sin embargo, no se incluyen los rodales de tipo agrícola o urbano, por no contar con vegetación arbórea completa del tipo de coníferas, es decir, hay vegetación fragmentada.

2.6.1. Índice de densidad de rodales (IDRR)

La tabla 1 muestra los resultados del análisis de regresión del modelo utilizado para estimar el número de árboles por hectárea en función del diámetro cuadrático promedio de cada rodal.

Cuadro 1. Análisis del modelo de Reineke (1933) para el ejido Meson Viejo

Modelo	r^2	r	p-valor
$N = \beta_0 + dq^{-\beta_1}$	0.99	0.99	≥ 0.0001

Cuadro 2. Análisis del modelo de Reineke (1933) para el Ejido Agua Bendita

Modelo	r^2	r	p-valor
$N = \beta_0 + dq^{-\beta_1}$	0.99	0.99	≥ 0.0001

Los resultados del cuadro 1 y 2 indican evidencia que el análisis de varianza es altamente significativa (p -valor ≥ 0.0001), ya que el valor del coeficiente de

determinación es de 0.99 y un error estándar de muy bajo; de acuerdo a tal análisis se deduce que el número de árboles de *Pinus pseudostrobus* es producto de la predicción del diámetro medio cuadrático, es decir, la ecuación puntualizada por Reineke (1933), presentó un buen ajuste a los datos, y de esta manera indica que el modelo explica un alto porcentaje de la variabilidad de la variable diámetro cuadrático.

El modelo de Reineke permitió obtener el promedio del total de árboles por hectárea de acuerdo con los siguientes valores, es decir, el modelo ajustado adoptó la siguiente expresión:

$$N = 170600 * dq^{-1.667}$$

$$N = 60895.8059 * dq^{-1.4399}$$

De esta manera para el diámetro medio cuadrático de referencia (25 cm) el índice de densidad de Reineke se obtiene de la siguiente forma:

$$IDRR = 170600 * 25^{-1.667}$$

$$IDRR = 60895.8059 * 25^{-1.4399}$$

El índice de densidad de rodal de Reineke= 797 y 591 árboles/hectárea respectivamente.

La ecuación presentó un coeficiente de determinación del 99 % para ambos ejidos, en otras palabras, existe una buena relación entre el número de árboles por hectárea y el diámetro cuadrático medio de cada uno de los predios.

La figura 3 muestra un diagrama de manejo de densidad para el Ejido Mesón Viejo, el eje de las X representa a la altura dominante, el eje de las Y representa al Número total de árboles por hectárea; de este modo se despejó el valor del número de

árboles por hectárea para representar a las isolíneas del diámetro medio cuadrático, de esta misma manera se obtienen las isolíneas del volumen del rodal.

Se muestra el índice de densidad del rodal de Reineke representando a los diferentes diámetros cuadráticos encontrados en el predio de estudio, es decir, si consideramos una altura dominante de 25 metros con un diámetro medio cuadrático de 38 centímetros, tendríamos un número total de 800 árboles por hectárea con un volumen aproximado de 450 m³/ha (punto verde en la figura 3).

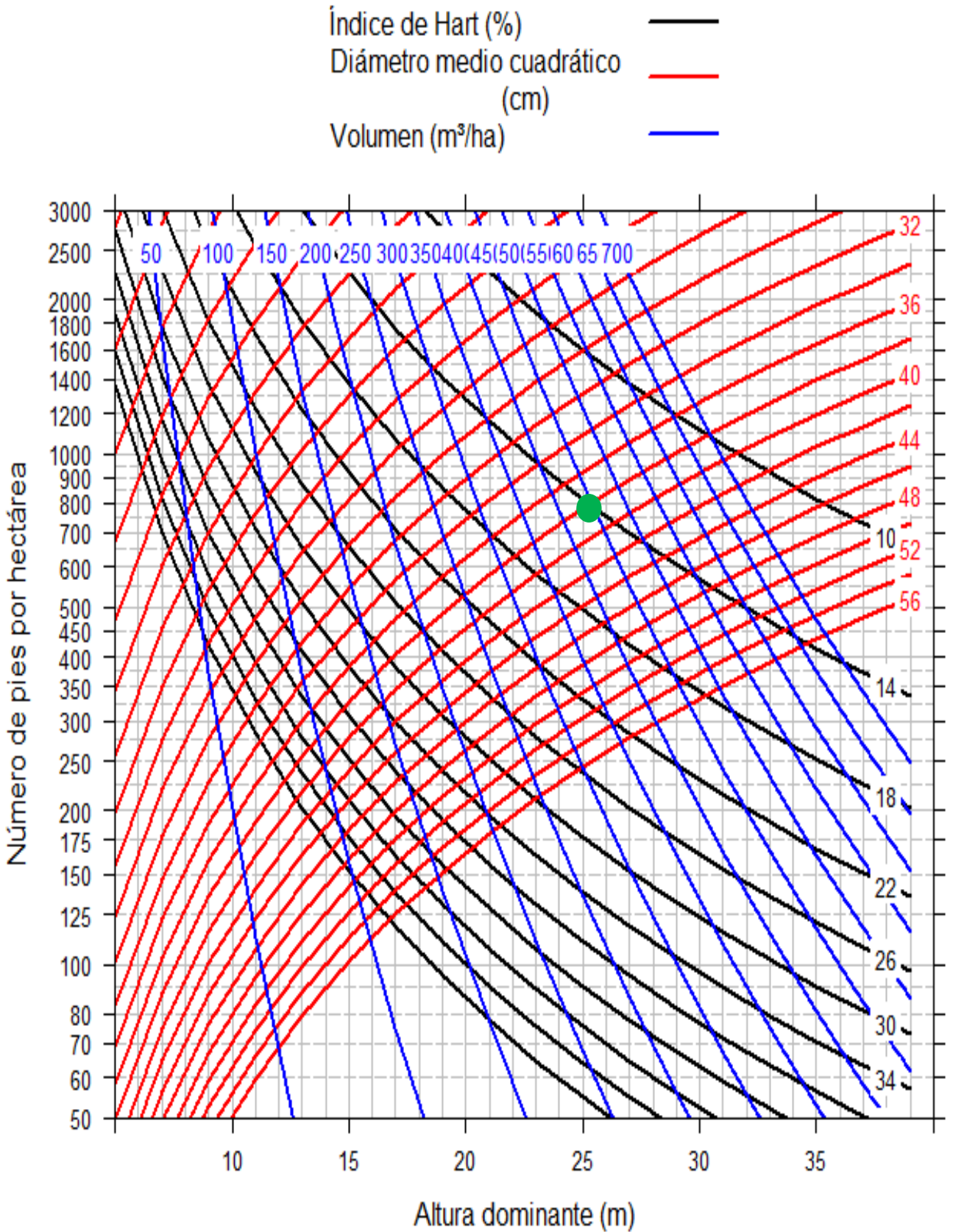


Figura. 3 Diagrama de densidad.

El valor del IDRR está determinado por el β_0 (Zepeda, 1984), por lo tanto, el sistema de líneas de densidad de rodales de Reineke pueden construirse a partir de una referencia variando el valor del parámetro β_0 .

Cuadro 3. Número de árboles por hectárea de acuerdo con el IDRR

Diámetro medio cuadrático(cm)	Número total de árboles/hectárea	
	Ejido Mesón Viejo	Ejido Agua Bendita
5	11663	6000
10	3673	2212
15	1868	1233
20	1157	815
25	797	591
30	588	455
35	455	364
40	364	300
45	299	254
50	251	218
55	214	190
60	185	168
65	162	149
70	143	134
75	128	122
80	115	111
85	104	101
90	94	93
95	86	86
100	79	80

Así para mover la línea de referencia de 797 a 1000, o de 591 a 600 el valor de β_0 será:

$$\log(1000) = -1.667 * \log(25) + \beta_0$$

$$\beta_0 = 5.330365$$

$$\log(600) = -1.4399 * \log(25) + \beta_0$$

$$\beta_0 = 4.791045$$

Suponiendo que se quiere conocer el valor de β_0 para el siguiente número de árboles se obtiene que:

Cuadro 4. Valores de las líneas proporcionales para un número de árboles dado en intervalos de 100

Número de árboles	B_0	
	Ejido Mesón Viejo	Ejido Agua Bendita
100	4.33036599	4.01289382
200	4.63139599	4.31392381
300	4.80748725	4.49001507
400	4.93242599	4.61495381
500	5.029336	4.71186382
600	5.10851724	4.79104507
700	5.17546403	4.85799186
800	5.23345598	4.91598381
900	5.2846085	4.96713633
1000	5.33036599	5.01289382

De esta manera es posible estimar los valores del IDRR y conocer el comportamiento de la línea que cada ecuación representa, es decir, para un número de árboles conocido al igual que un diámetro cuadrático, se puede determinar el Índice de densidad de rodal de Reineke con la siguiente ecuación:

$$IDRR = N * \left(\frac{Dc}{Dq}\right)^{-\beta 1}$$

Donde:

Dc= Diámetro cuadrático del rodal (cm)

Dq= Diámetro cuadrático de referencia (cm)

Se calculó el índice de densidad de rodal de Reineke con un N= 797 árboles por hectárea que es lo que sale en este estudio con respecto al Ejido Mesón Viejo, en el cuadro 5 se observan los siguientes resultados:

Cuadro 5. IDRR de acuerdo con el diámetro cuadrático de cada uno de los rodales en el Ejido Mesón Viejo

No. Rodal	Diámetro cuadrático del rodal (cm)	IDRR
1	36	435
5	28	664
7	34	470
9	24	853
10	57	202
11	30	584
12	33	500
13	37	416
14	24	879
16	26	740
18	36	433
19	33	506
20	28	655
21	26	737

22	23	926
23	42	330
24	34	488
28	38	392
29	23	935
30	34	467
32	28	642
33	38	400
36	38	399
38	30	584
39	39	383
40	34	483
41	39	378
42	33	490
43	47	281
44	32	523
45	37	418
46	32	517
47	33	496
48	44	316
49	26	747
50	35	445
51	41	346
54	29	610
55	36	434
58	23	942
61	32	528
90	35	456
91	30	594
92	35	445
93	26	735
94	33	493
95	45	297

96	36	440
99	43	327
102	18	1442

También se calculó el índice de densidad de rodal de Reineke con un N= 591 árboles por hectárea que es lo que sale en este estudio con respecto al Ejido Agua Bendita, en el cuadro 6 se observan los siguientes resultados:

Cuadro 6. IDRR de acuerdo con el diámetro cuadrático de cada uno de los rodales en el Ejido Agua Bendita

Rodal	Diámetro medio cuadrático (cm)	IDRR
6	30	455
8	15	1233
11	28	502
14	29	477
15	38	323
18	13	1515
21	16	1124
22	29	477
23	15	1233
36	34	380
38	14	1362
40	11	1927
41	11	1927
45	35	364
49	32	414
52	43	271
55	44	262
56	22	710
57	31	434
58	20	815

60	16	1124
61	41	290
62	12	1700
85	16	1124

Para la obtención del área basal por hectárea se calculo mediante la siguiente expresión:

$$\frac{Ab}{ha} = \beta_0 * Dc^{-\beta_1} * 0.00007854 * Dc^2$$

Cuadro 7. Área basal por diámetro cuadrático

Diámetro Cuadrático medio (cm)	Área Basal/hectárea	
	Ejido Mesón Viejo	Ejido Agua Bendita
5	22.8995	11.7807
10	28.8450	17.3691
15	33.0148	21.7975
20	36.3340	25.6086
25	39.1367	29.0178
30	41.5864	32.1376
35	43.7769	35.0357
40	45.7674	37.7565
45	47.5981	40.3313
50	49.2977	42.7830
55	50.8875	45.1290
60	52.3835	47.3828
65	53.7985	49.5554
70	55.1426	51.6556
75	56.4242	53.6908

80	57.6499	55.6671
85	58.8256	57.5898
90	59.9560	59.4634
95	61.0453	61.2916
100	62.0969	63.0781

2.6.2. Factor de competencia de copas (FCC)

Para representar la relación entre el diámetro de copa y el diámetro normal la ecuación quedó de la siguiente forma para el Ejido Mesón Viejo y para el Ejido Agua Bendita respectivamente:

$$dc = 1.51832 + 0.16513 * dn$$

$$dc = 1.98607 + 0.08744 * dn$$

Donde:

dc = diámetro de copa

dn = diámetro normal

Cuadro 8. Análisis de varianza para el modelo del diámetro de copa

Modelo	r ²	r	p-valor
$dc = \beta_0 + \beta_1 * dn$	0.94	0.96	> 0.0001

El análisis del modelo arroja 94% de variación del diámetro de copa en función del diámetro normal, este análisis predice satisfactoriamente el diámetro de copa de los

árboles de *Pinus pseudostrobus* en el Ejido Mesón Viejo “Dotación”, en tanto, para el Ejido Agua Bendita el análisis arrojó un 92.9% de variación.

Para la obtención del área máxima de copa se obtuvo que:

$$amc = 0.7854 * (1.51832 + 0.16513 * dn)^2$$

$$amc = 0.7854 * (1.98607 + 0.08744 * dn)^2$$

Donde:

dc= diámetro de copa (m)

dn= diámetro normal (cm)

Con la obtención del área máxima de copas se estimo el numero mínimo de arboles por hectárea que crecerán libres de competencia, es decir, el área máxima de copas expresa la superficie que ocupará un árbol determinado en un rodal.

El número total de árboles por hectárea se calculó mediante la expresión siguiente:

$$N = 10000/amc$$

De igual manera el área basal por hectárea se calculó así:

$$Ab/ha = N * (dn/100)^2 * 0.7854$$

Donde

dn = diámetro normal (cm)

amc=área máxima de copa (m²)

Ab= área basal (m²)

N= número total de árboles por hectárea

Cuadro 9. Área máxima de copa, número de árboles por ha, y área basal para *Pinus pseudostrobus* en el Ejido Mesón Viejo

Diámetro normal (cm)	Área Máxima de copa (m ²)	No. Árboles por ha	Área basal (m ² /ha)
5	4.32	2317	4.55025684
10	7.89	1267	9.9537242
15	12.54	798	14.0958169
20	18.25	548	17.2107637
25	25.04	399	19.6024604
30	32.90	304	21.4850301
35	41.83	239	23.0008477
40	51.83	193	24.2455184
45	62.90	159	25.2847993
50	75.04	133	26.1651044
55	88.26	113	26.920005
60	102.54	98	27.5743281
65	117.89	85	28.1468010
70	134.32	74	28.6518017
75	151.81	66	29.1005440
80	170.38	59	29.5018983
85	190.02	53	29.8629702
90	210.73	47	30.1895169
95	232.51	43	30.4862518
100	255.36	39	30.7570698

Cuadro 10. Área máxima de copa, número de árboles por ha, y área basal para *Pinus pseudostrobus* en el Ejido Agua Bendita

Diámetro cuadrático medio (cm)	Área máxima de copa (m ²)	Número de árboles/hectárea	Área Basal (m ² /ha)
5	4.6121	2168	4.2573
10	6.4264	1556	12.2215
15	8.5409	1171	20.6904
20	10.9557	913	28.6754
25	13.6708	731	35.9068
30	16.6861	599	42.3622
35	20.0017	500	48.1017
40	23.6175	423	53.2081
45	27.5335	363	57.7636
50	31.7498	315	61.8428
55	36.2664	276	65.5107
60	41.0832	243	68.8223
65	46.2002	216	71.8246
70	51.6175	194	74.5572
75	57.3351	174	77.0536
80	63.3529	158	79.3422
85	69.6709	144	81.4474
90	76.2892	131	83.3898
95	83.2078	120	85.1872
100	90.4266	111	86.8550

2.7. DISCUSIONES

1. En primer lugar, se puede indicar que la relación que existe entre el número de árboles por hectárea y el diámetro cuadrático medio, puede ser utilizada para predecir el número total de árboles máximo que cierto rodal pueda soportar sin dejar de lado un aprovechamiento adecuado.
2. En cuanto al índice de densidad de rodales de Reineke se obtiene de la relación que existe entre el diámetro cuadrático medio de referencia y el diámetro normal, su resultado se utiliza para tener una ocupación completa del espacio de crecimiento con respecto a su diámetro promedio, por lo que su espacio de crecimiento tiende a ser mínimo. A pesar de trabajar con la misma especie, los resultados al momento de calcular el número total de árboles a través del Índice de densidad de rodales fueron totalmente diferentes en el diámetro cuadrático de referencia, para el caso de Ejido Mesón Viejo se obtuvieron 797 árboles y para el Ejido Agua Bendita solamente 591 árboles, es decir, 206 árboles menos; no obstante, los valores arrojados para la r^2 fueron similares, en ambos casos fue de 0.99, es decir, existe una relación proporcional en del área ocupada por un árbol con referencia a su diámetro normal medio, al desarrollarse en una densidad alta el espacio de crecimiento de cada uno de los árboles tiende a ser muy poco o mínimo.
3. Éste estudio presentó un ajuste a la recta con un valor de la pendiente de -1.667 para el Ejido Mesón Viejo y, para el Ejido Agua Bendita el valor de la pendiente fue de -1.439, muy cercanos al valor reportado por Reineke, cuyo valor es de -1.605.

Cuadro 11. Comparación de valores de pendientes de diferentes estudios para especies forestales comerciales

Especie	Valor de la pendiente	Autor (es)
<i>Quercus sp</i>	-1.499	Daniel et al, (1982)
<i>Populus sp</i>	-1.515	Daniel et al, (1982)
<i>Pinus hartwegii</i>	-1.669	Zepeda y Villareal, (1987)
<i>Pinus pseudostrobus</i>	-1.545	Aguirre y Jiménez, (1992)

<i>Pinus montezumae</i>	-1.933	Balderas y Rodríguez, (1989)
<i>Pinus patula</i>	-1.460	Monroy, (1997)
<i>Pinus hartwegii</i>	-1.6	Vargas, (1999)
<i>Pinus cooperi</i>	-1.61	Márquez y Alvarez, (1995)
<i>Pinus montezumae</i>	-1.534	Hernandez et al, (2013)

4. Para el caso del factor de competencia de copas se obtuvo la cantidad de 2317 y 2168 árboles por hectárea, para los Ejidos Mesón Viejo y Agua Bendita respectivamente, esto es, en algunos estudios estos valores son muy similares, y en algunos otros casos existe una diferencia muy considerable. Una recomendación es que los parámetros se han evaluados de acuerdo con los datos de cada especie, ya que varían entre sí, también se pueden estimar mediante ecuaciones ya establecidas para bosques de especies análogas como fue el caso en este trabajo.

2.8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aragón-Piña, Elizabeth E., A. Garza-Herrera, M. Socorro González-Elizondo e Isolda Luna-Vega. 2010. Composición y estructura de las comunidades vegetales del rancho El Duranguense, en la Sierra Madre Occidental, Durango, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 771-787.
- Arias, F. (2004). *El proyecto de investigación*. 4ta edición. Caracas, Venezuela: Editorial Episteme Venezuela.
- Aguirre, C. O. A. 1984. Estimación de índices de sitio para *Pinus Pseudostrobus* Lindl., en la región de Iturbide, Nuevo León. Tesis profesional. U. A. Ch., Chapingo, México. 64 p.
- Aguirre, C. O. A. 1996. Manejo Forestal I (MCF-700). Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N.L. 59 p.
- Aguirre, C. O. A. 1997. Manejo Forestal. (MCF-700). Programa de Maestría en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L., México.
- Balderas, A. M. y R. Rodríguez F. 1989. Elaboración de tres guías de densidad para *Pinus montezumae* Lamb., en el C.E.F. San Juan Tetla, Puebla. Tesis profesional. Di. Ci. Fo. UACH. Chapingo, México. 71 p.
- Becerra, L. F. 1985. Los índices de densidad. Simposio sobre Silvicultura y Manejo de Bosques en México. 25p.
- Becerra, L. F. 1986. Determinación de una guía de densidad para *Pinus patula* Schl. et Cham. En la región de Chignahuapan - Zacatlán, Pue. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 82 p.
- CATIE. 1997. Nota técnica sobre manejo de semillas forestales. *Pinus pseudostrobus* Lindl. No. 13. Turrialba, Costa Rica.
- Centeno D. J. J. 2013. Diagramas de manejo de la densidad para *Pinus cooperi* y *Pinus durangensis* en Durango, México. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. México.
- Challenger, A. 2003. Conceptos generales acerca de los ecosistemas templados de montaña de México y su estado de conservación. In *Conservación de ecosistemas templados de montaña en México*, O. Sánchez, E. Vega, E. Peters y O. Monroy-Vilchis (eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE, SEMARNAT)/ SyG, México, D. F. p. 17-44.

- Chauchard, L. M. 2001. Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* D. Don en el territorio histórico de Guipúzcoa (País Vasco). Tesis doctorales N° 40 Departamento de Agricultura y Pesca. Gobierno del País Vasco. País Vasco, España. 173 p
- Chisman, H. H. and F. Schumacher. 1940. On the tree-area ratio and certain of its applications. *J. Forest.* Vol. 38 (4): 311-317.
- Corvalán P. 1985. Ralind: Un simulador de raleo en árboles individuales. Apuntes de clases mecanografiados. Departamento de manejo de recursos forestales. Universidad de Chile.
- Corvalán V. P., y Hernández P.J. 2006. Catedra de dasimetría. Departamento de manejo de recursos forestales. Universidad de Chile.
- Curtis, R. O. 1970. Stand density measures, An interpretation. *For. Sei.* 16(4) :403-414.
- Daniel, P. W.; Helmes, U. E.; Baker, F.S. 1982. Principios de Silvicultura. 1ª edición en español. McGraw Hill, México. 492 p.
- Davis, K. P. and K. N. Johnson. 1987. Forest management. 3rd. Ed. McGraw-Hill. New York. 519 p.
- Del Río, M., G. Montero, and F. Bravo. 2001. Analysis of diameter-density relationships and self-thinning in nonthinned even-aged Scots pine stands. *For. Ecol. Manage.* 142: 79-87.
- DEAN, J.T. & BALDWIN, V.C.; 1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station. Res. Pap., SO 275.
- Eguiluz P. T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos sobre el género *Pinus* en México. Tesis Profesional. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo. México, D. F. 623 p.
- Fernández R. R. 1999. Guía de densidad para *Pinus arizonica* Engelm. Ejido Talayotes Chihuahua. 173 pp.
- Fierros, G. A. M. 1993. Manejo de la densidad en rodales coetáneos. Academia Nacional de Ciencias Forestales. México. 15p.
- García, R. F.T. y E. Hernández. V. 1995. Elaboración de dos guías de densidad para *Pinus patuia* Schl. et Cham. en la región de Macuiltianguis, Oaxaca. *Revista Chapingo, Serie: Ciencias Forestales.* Vol. 1 Num. 1. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México, p. 83-89.

- Gingrich, S.F. 1967. Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forests in the Central States. *For. Sci.* 13(1):38-53.
- Hawley, R. C. Y Smith D. M. 1972. *Silvicultura práctica*. Trad. del Inglés por J. Terradas 6a. Ed. Barcelona. Omega. 544 p.
- Hernández R. J, J. J. M., García, J. H. F, Muñoz., X. C. García., T. R. Sáenz., C. L, Flores., A. R, Hernández. 2013. Guía de densidad para manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 4.19. 62-77.
- Husch, B., C. Miller and T. Beers. 1982. *Forest mensuration*. John Wiley and Sons, Inc. New York, NY. USA. 402 p.
- Krajicek, E. J., A. K. Brinkman and S. F. Gingrich. 1961. Crown competition, a measure of density. *Forest Sci.* 16 (1):5-42.
- Luna, A. R. 1991. Elaboración de una guía de densidad para *Pinus Engelmannii*, *P. herrerae*, *P. leiophylla* y *P. teocote* en la región de El Salto, Dgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Di. Ci. Fo. Chapingo, México. 71 p.
- Márquez-Linares Marco A. y Alvarez-Zagoya, Rebeca. 1995, Construcción de una guía de densidad para *Pinus cooperi* var. *ornelasi* con base en la clase de copa en Durango, México. *Madera y Bosques* 1(2), pp 23-36.
- Martínez M. 1948. *Los pinos mexicanos*. Segunda edición. Ediciones Botas. México. 361 p.
- Martinez S. M., y Quiñones B. G. 2015. Diagramas de manejo de la densidad con modelación de regresión frontera estocástica para mezcla de especies de la UMAFOR 0807 Guachochi, Chihuahua, México.
- Mccarter, J.B., and Long, J.N. 1986. A lodgepole pine density management diagram. *West. J. Appl. For.* 1:6 –11.
- Monroy, R. C. R. 1997. Evaluación del crecimiento y productividad de *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Huayacocotla, Veracruz, México. Tesis Maestría en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N. L., México. 92p.
- Navarro, J.A., Ohmann, E., Sanchez, D., Botella, J.A., Liebisch, G., Moltó, M.D., Ganfornina, M.D., Schmitz, G., Schneuwly, S. (2010). Altered lipid metabolism in a *Drosophila* model of Friedreich's ataxia. *Hum. Mol. Genet.* 19(14): 2828--2840.
- NEWTON, P.F. & WEETMAN, G.F.; 1994. Stand density management diagram for managed black spruce stands. *For. Chron.* 70, 65-74.

- Perry J. P. 1992. The Pines of México and Central América. Timber Press. Portland, Oregon. USA. 231 p.
- Pretzsch, H. 2009. Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 664 p.
- Quiñonez, B. G. 2014. Sistema de crecimiento y rendimiento para las principales especies comerciales de Pinus en Durango, México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México, México. 192 p.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forest. Journal of Agriculture Res. 46(7): 627-638.
- Rodríguez L., R., R. Z. Razo, D. H. Díaz y J. R. Meza. 2009. Guía de densidad para Pinus montezumae en su área de distribución natural en el Estado de Hidalgo. Folleto Técnico No. 1. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Instituto de Ciencias Agropecuarias. Área Académica de Ingeniería Forestal. Tulancingo de Bravo, Hgo. México. 31 p.
- Saéñz R. J. T., Muñoz F. H.J. y Rueda S. A. 2011. Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. INIFAP.
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, D. H. Del Valle-Paniagua y J. J. Corral-Rivas. 2013. Auto-aclareo y guías de densidad para Pinus patula mediante enfoque de regresión de frontera estocástica. Agrociencia 47: 75-89.
- SEMARNAP. 2006. Especies con usos no maderables en bosques de encino, pino y pino-encino en los estados de Chihuahua, Durango, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Pinus pseudostrobus Lindl. Procymaf. In: <http://www.semarnat.gob.mx/pfnm/PinusPseudostrobus.html> (Disponible 25 de Mayo del 2006).
- Seymour, R.S. and D.M. Smith 1987. A new stocking guide formulation applied to eastern white pine. For. Sci. 33:469-484.
- Smith, David M. 1986. The practice of silviculture. 8th ed. New York: John Wiley and Sons. 527 p
- Sturtevant, M.A., Roark, M., O'Neill, J.W., Biehs, B., Colley, N., Bier, E. (1996). The Drosophila rhomboid protein is concentrated in patches at the apical cell surface. Dev. Biol.174(2): 298--309.
- Torres, R. J. M. 1984. Tablas de rendimiento de densidad variable para Pinus hartwegii Lind. En la estación forestal experimental Zoquiapan, México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.278p.

- Vacchiano, G., R. Motta, J. N. Long, and J. D. Shaw. 2008. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): A tool for assessing the forest's protective effect. *For. Ecol. Manage.* 255: 2542-2554.
- Vargas L. B. 1999. Caracterización de la productividad y estructura de *Pinus hartwegii* Lindl. En tres gradientes altitudinales en el Cerro Potosí, Galeana, Nuevo León. Tesis de Maestría. Facultad de ciencias forestales. UANL, México. P114.
- Vega, C; Andrade, F; Sadras, V; Uhart, S; Valentinuz, O. 1995. Seed Number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower and maize. *Crop Science* 41. Pág. 748-754.
- Yoda Kira, K. T., H. Ogawa and K. Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands Under Cultivated and natural conditions. *Journal of Biology.* 14: 107-129
- Zepeda, B. E. M. 1983: Análisis de diez procedimientos para estimar incrementos volumétricos de coníferas. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 600p. aprox.
- Zepeda, B. E. M. 1984. Ejemplificación de tres procedimientos para caracterizar rodales por su densidad. Serie de Apoyo Académico No.34. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, México. 57p.
- Zepeda, B. E. M. y Villarreal, D. M. E. 1987. Guía de densidad para *Pinus hartwegii* Lindl., Zoquiapan, México. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias forestales. Chapingo, México. 52p.
- Zeide, B. 1987. Analysis of the 3/2 power law of self-thinning. *For. Sci.* 33: 517–537.
- Zeide, B. 2004. Optimal stand density: a solution. *Can. Jour. For. Res.* 34: 846-854
- Zepeda, B. E. M. 1990. Predictor de rendimientos maderables probables de *Pinus patula* Schiede y Deppe., de Perote, Ver. México. Tesis Maestría en Ciencias. Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 331 p.
- Wu, J. & Loucks, O. L. From balance of nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology. *Quarterly Review of Biology* 70, 439–466 (1995).