



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

GUÍAS DE DENSIDAD PARA MASAS MEZCLADAS DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA

JULIA MARTÍNEZ LÓPEZ

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

La presente tesis titulada: **Guías de densidad para masas mezcladas de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca**, realizada por la alumna: **Julia Martínez López**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



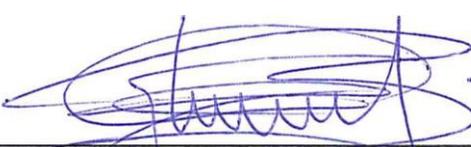
Ph. D. Héctor Manuel de los Santos Posadas

ASESOR



Ph. D. Valentín José Reyes Hernández

ASESOR



Dr. Gerónimo Quiñonez Barraza

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2017

GUÍAS DE DENSIDAD PARA MASAS MEZCLADAS DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA

Julia Martínez López, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

RESUMEN

La gestión forestal en San Pedro el Alto, Oaxaca, tiene dos principales enfoques: la producción de madera comercial de las especies de *Pinus* y preservar la composición de las especies presentes; el cumplimiento de los objetivos requiere de herramientas que proporcionen información precisa y confiable para la aplicación de los tratamientos silvícolas, específicamente aclareos. En este estudio se desarrollaron diagramas de manejo de la densidad (DMDs) para caracterizar la densidad de rodales mediante la relación tamaño promedio-densidad y generar escenarios de prescripciones de aclareos. En esta investigación el primer paso fue estimar la línea de densidad máxima (LDM) utilizando los enfoques de Reineke, Yoda y la relación altura dominante-densidad (espaciamiento relativo, ER). Los métodos de ajuste que se utilizaron fueron mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y regresión de frontera estocástica (RFE), ambos métodos se ajustaron con el 20 % del total de observaciones que representan a los sitios más densos. En estos dos enfoques la LDM estimada a partir de MCO y RFE produce resultados muy similares cerca del límite superior de los datos siendo el enfoque de RFE con errores semi-normales el que produce la mejor definición de la frontera máxima.

Para el DMD basado en el ER la línea de densidad máxima se estimó con MCO y se ajustaron ecuaciones simultáneas de diámetro cuadrático (Dq) y volumen por ha (VHA). Los DMDs desarrollados en cada uno de los enfoques sugieren que la densidad absoluta de las masas mezcladas es adecuadamente caracterizada, pero que se requiere que la composición del rodal se mantenga de forma tal que no se favorezca demasiado la

presencia de las especies tolerantes a la sombra, ya que en este caso se estaría subestimando la densidad máxima posible.

Palabras clave: aclareos, espaciamiento relativo, línea de densidad máxima, regresión de frontera estocástica.

DENSITY GUIDES FOR MIXED FORESTS AT SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA

Julia Martínez López, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

ABSTRACT

Forest management at San Pedro el Alto follow two basic guidelines: Timber production from commercially relevant pine species and preserving species composition at stand level. Fulfilling both objectives requires silvicultural tools that provide accurate and reliable information needed to correctly apply treatments such as thinning. In this study size-density Density management Diagrams (DMDs) were built to properly characterize stand density. The first step to build a DMD is to define de maximum density frontier that was done Reineke, Yoda and relative spacing (RS) approaches. For Reineke and Yoda the maximum density limit was estimated by obtaining the densest 20% of all inventory plots and using OLS and frontier regression methods (FRM). In this case both fitting approaches estimated a very similar maximum limit but the RFM using a semi-normal error structure produce the best results. For RS only OLS were used to determine the maximum density frontier together with a system of simultaneous equations that describe quadratic mean diameter and volume per ha. The DMDs on the various perspectives suggest that mixed stands properly characterize absolute size-density relationship for mixed forest, but stand composition should be carefully monitored to avoid the stands to shift to more a more shade-tolerant stand composition in this case maximum absolute density will be underestimated.

Key words: thinning, relative spacing, maximum size-density relationships, stochastic frontier regression.

Dedico esta tesis:

A Dios, ser que creo este maravilloso mundo. Así como me dio vida, ha estado conmigo en todo momento, a quien agradezco infinitamente por darme los padres y familia que gozosamente presumo. A las virgencitas de Guadalupe y Juquila que me inspiran mucha fe y creo fielmente en ellas.

A mis padres, Felipe Martínez Julian y Carmelitas Yfiginia López Santiago por las constantes muestras de afecto, apoyo incondicional, por alentarme siempre a seguir adelante y confiar plenamente en mi persona.

A mis hermanos: Emiliano, Cristina, Cirila, Rosario, Yahamelid, Efrain y sobrinos, por ser el apoyo moral que me alienta a seguir con mi desarrollo profesional.

Con amor

Julia Martínez López

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por rodearme de personas que me brindaron todo el apoyo y darme la oportunidad de cumplir con este objetivo.

Al Colegio de Postgraduados (COLPOS) en el *Campus Montecillo* en el Programa del Postgrado en Ciencias Forestales, por aceptarme como estudiante y por compartir conocimientos dentro y fuera del aula que forman parte de esta investigación.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por financiar mis estudios de maestría, y hacer posible la culminación de una etapa más en mi vida profesional.

Al Consejo Oaxaqueño de Ciencia y Tecnología (COCYT), por brindarme la oportunidad de formar parte del programa “Incorporación de Mujeres Indígenas en Postgrados para el Fortalecimiento Regional”, con especial énfasis en los cursos propedéuticos.

Al Ph. D. Héctor Manuel de los Santos Posadas, por darme la oportunidad de formar parte de su grupo de estudiantes, su siempre disponibilidad de apoyarme, sus tan acertados consejos y guiarme en el escrito. Siempre me sorprendió la forma en que toma las cosas, prácticamente no hay imposibles y lo que para mí era un gran problema para el doctor era una experiencia ya vivida, me quedo con una de sus frases “nada está escrito en piedra”.

Al Ph. D. Valentín José Reyes Hernández, por sus asesorías, su siempre disponibilidad y acertadas sugerencias en la mejora del escrito y por siempre alentarme a que si se puede.

Al Dr. Gerónimo Quiñonez Barraza, por tener la disponibilidad de asesorar este trabajo aun con la distancia, sus sugerencias y comentarios fueron tan valiosos que hicieron posible la redacción de esta tesis.

Al personal docente y administrativo del Postgrado Forestal, por todo el apoyo que me brindaron durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo.

Al Dr. José Cristóbal Leyva López, por todas las muestras de apoyo que siempre me ha brindado para mi desarrollo profesional.

A la comunidad de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca, pero sobre todo al equipo técnico forestal de la comunidad. Agradecimiento especial al Ing. Moisés Raúl Hernández Cortés por permitir el acceso a la base de datos del nuevo plan de manejo de la comunidad y a todos aquellos que hicieron posible la toma de datos en campo durante el inventario estratégico y operativo y trabajadores de gabinete.

Agradezco a los compañeros: Secundino Torres Lamas, Jonathan Hernández Ramos, Adrián Hernández Ramos, María de los Ángeles Soriano Luna, Martín Aquino Ramírez, Leonardo Beltrán, Juan Esteban Torres y Vicente Florencio Vásquez Cortez que compartieron su experiencia, conocimientos y desvelos en tiempos de cursos, les deseo éxito en su vida tanto profesional como personal.

A Ramiro Puc Kauil, por todos los momentos de alegría que ha compartido conmigo y por ser un gran apoyo en esta etapa de mi vida profesional.

CONTENIDO

	Página
CONTENIDO.....	i
LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	vi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. ÍNDICES DE DENSIDAD PARA MASAS FORESTALES	3
1.1.1. ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA	4
1.1.2. LEY DEL AUTO-ACLAREO O DE YODA.....	6
1.1.3. ESPACIAMIENTO RELATIVO O ÍNDICE DE HART.....	7
1.2. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD: COMPONENTES Y USOS....	9
1.3. OBJETIVOS	10
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	10
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
1.4. LITERATURA CITADA.....	10
CAPÍTULO II	16
DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDAD PARA BOSQUES MEZCLADOS DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA	16
2.1. RESUMEN	16
2.2. ABSTRACT	18
2.3. INTRODUCCIÓN	19
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS	24
2.4.1. ÁREA DE ESTUDIO Y FUENTE DE INFORMACIÓN.....	24
2.4.2. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DE LA DENSIDAD MÁXIMA EN BOSQUES MEZCLADOS.....	25

2.4.3. MÉTODOS DE AJUSTE DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA	28
2.4.4. SELECCIÓN DE LOS DATOS PARA MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS.....	31
2.4.5. REGRESIÓN DE FRONTERA ESTOCÁSTICA	32
2.4.6. AJUSTE DE LOS MODELOS E INDICADORES ESTADÍSTICOS	33
2.4.7. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD	33
2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
2.5.1. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO ABSOLUTO CON EL IDR	34
2.5.2. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO ABSOLUTO CON EL IDY.....	38
2.5.3. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO CON PROPORCIONES DE ESPECIES	41
2.5.4. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD	42
2.6. CONCLUSIONES.....	44
2.7. LITERATURA CITADA.....	45
CAPÍTULO III	50
MANEJO DE LA DENSIDAD USANDO ESPACIAMIENTO RELATIVO EN UN BOSQUE MEZCLADO DE SAN PEDRO EL ALTO	50
3.1. RESUMEN	50
3.2. ABSTRACT	51
3.3. INTRODUCCIÓN	52
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS	54
3.4.1 COLECTA DE DATOS	54
3.4.2. AGRUPACIÓN DE ESPECIES Y ESTIMACIÓN DE VARIABLES.....	55
3.4.3. ÍNDICE DE ESPACIAMIENTO RELATIVO	56

3.4.4. LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA CON BASE EN EL ER.....	57
3.4.5. DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD.....	58
3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
3.5.1. DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA.....	61
3.5.2. AJUSTE DE LAS RELACIONES ALOMÉTRICAS.....	62
3.5.3. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD.....	64
3.5.4. USO DEL DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD.....	67
3.6. CONCLUSIONES.....	69
3.7. LITERATURA CITADA.....	69
CAPÍTULO IV.....	74
USO DE LOS DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDAD.....	74
4.1. DMD BASADO EN EL ENFOQUE DE REINEKE.....	75
4.2. DMD BASADO EN EL ENFOQUE DE YODA.....	84
4.3. DMD BASADO EN EL ESPACIAMIENTO RELATIVO.....	91
CAPÍTULO V.....	98
CONCLUSIONES GENERALES.....	98

LISTA DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Estadísticos del ajuste del modelo de Reineke con cuatro conjuntos de datos provenientes de los sitios con mayor ocupación (sitios densos).....	36
Cuadro 2. Estadísticos del ajuste para el modelo de Reineke con RFE.	37
Cuadro 3. Estadísticos del ajuste del modelo de Yoda con cuatro conjuntos de sitios más densos mediante MCO.	39
Cuadro 4. Estadísticos del modelo de Yoda con RFE.....	40
Cuadro 5. Estimadores del modelo de Reineke con pendiente constante.	41
Cuadro 6. Estimadores del modelo de Reineke con pendiente variable.	41
Cuadro 7. Estadísticos de las variables usadas en la construcción del DMD del bosque mezclado de San Pedro el Alto.....	56
Cuadro 8. Estimadores de la ecuación 2 para la línea de densidad máxima.	62
Cuadro 9. Estadísticos y parámetros del ajuste simultáneo de las ecuaciones 3 y 4 para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.....	62
Cuadro 10. Características iniciales del rodal que se utilizó para la planeación de los aclareos.	75
Cuadro 11. Condición general de la secuela de aclareos utilizando el DMD basado en el enfoque de Reineke para un objetivo de manejo, mantener la composición de las especies.	77
Cuadro 12. Seguimiento de la secuela de aclareos y el crecimiento del rodal después de cada intervención.	79
Cuadro 13. Seguimiento de la secuela de aclareos que favorece a las especies de Pinus y el crecimiento del rodal después de la aplicación de los aclareos.	82
Cuadro 14. Condición general de la secuela de aclareos utilizando el DMD basado en el enfoque de Yoda para un objetivo de manejo: mantener la composición de especies.....	86
Cuadro 15. Secuela de aclareos sistemáticos con el objetivo de mantener la composición de especies del rodal con el DMD basado en el enfoque de Yoda.	88

Cuadro 16. Secuela de aclareo que se realizó con el objetivo de tener solo especies de Pinus en la cosecha final usando el DMD basado en el enfoque de Yoda.	91
Cuadro 17. Secuela de aclareo para el rodal con el objetivo de mantener la composición de especies utilizando el DMD basado en el espaciamiento relativo.	93
Cuadro 18. Secuela de aclareo para un rodal de San Pedro el Alto, Oaxaca, cuyo objetivo es mantener solo especies de Pinus para la cosecha final.	96

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Distribución del diámetro cuadrático promedio vs número de árboles por hectárea de la base de datos utilizada en el estudio.	30
Figura 2. Líneas de densidad máxima sobrepuestas a las observaciones, obtenidas con el modelo de Reineke mediante RFE y MCO.	38
Figura 3. Líneas de densidad máxima sobrepuestas a las observaciones, obtenidas con el modelo de Yoda mediante MCO y RFE.	40
Figura 4. Diagrama de manejo de la densidad basado en el IDR para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.	43
Figura 5. Diagrama de manejo de la densidad para el bosque mezclado de San Pedro el Alto con el IDY.	43
Figura 6. Distribución de la altura dominante promedio vs densidad del rodal de la base de datos utilizada para la estimación de la línea de densidad máxima.	58
Figura 7. DMD mediante el ER para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.	65
Figura 8. Diagrama de manejo de la densidad para el bosque mezclado con línea de densidad máxima y zona de crecimiento constante entre el 20 % y 35 % de ER.	66
Figura 9. Secuelas de aclareo en el DMD con el uso del ER para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.	68
Figura 10. Ubicación del rodal (utilizado como ejemplo) en el DMD basado en el enfoque de Reineke.	76
Figura 11. Secuela de aclareos para un rodal del bosque de San Pedro el Alto utilizando el DMD basado en el enfoque de Reineke.	78
Figura 12. Secuela de aclareos para favorecer a Pinus usando el DMD basado en el enfoque de Reineke.	84
Figura 13. Ubicación inicial del rodal sobre el DMD basado en el enfoque de Yoda.	85

Figura 14. Secuela de aclareos sistemáticos que permite preservar la composición de especies usando el DMD basado en el enfoque de Yoda.....	87
Figura 15. Secuela de aclareos en un rodal mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca, usando el DMD basado en el ER con el objetivo de mantener la composición de especies.....	94
Figura 16. Secuela de aclareos de un rodal mixto de San Pedro el Alto, cuyo objetivo es mantener solo especies de Pinus para la cosecha final, y manejándolo en la zona de crecimiento constante.....	97

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

El control de la densidad de los rodales es clave en el cultivo del bosque, y se lleva a cabo mediante los aclareos, que permiten liberar espacio de crecimiento para favorecer a los individuos remanentes al incrementar la disponibilidad de nutrientes, luz y agua (Daniel *et al.*, 1979; Bravo *et al.*, 1997). El aclareo como práctica silvícola de alto impacto requiere de una cuidadosa programación durante el turno. Aclareos tardíos habrán perdido la oportunidad de aprovechar el vigor de los árboles jóvenes y condiciones de crecimiento favorables para aumentar el valor financiero de la masa, además de perder la oportunidad de ingresos tempranos y un mayor esfuerzo económico y técnico debido a que se recomienda realizar reducciones de densidad mayores al 50 % (Dean y Baldwin, 1993; Vincent *et al.*, 2000; Musálem, 2006).

La programación de aclareos durante la vida de un rodal es una parte fundamental del trabajo del gestor forestal y si esta se realiza o no de manera adecuada depende de las habilidades del silvicultor para controlar el espaciamiento y la composición de la masa. Así, se han desarrollado los índices de densidad (ID) como herramientas para auxiliar al silvicultor, ya que estos se usan también como una medida de espacio disponible. Los ID son, en términos generales, expresiones que permite relacionar el tamaño (diámetro cuadrático, volumen promedio o altura dominante) con la densidad de los individuos de una población. Dichos índices parten de determinar las condiciones de densidad máxima posible que puede soportar un rodal a lo largo de su vida. Para establecer esta referencia (*i.e.* densidad máxima) se requiere de la toma de datos en bosques sin aclareos, de tal manera que la masa se encuentre en competencia plena y el crecimiento de los

individuos ocurra a expensas de la muerte de otros (Chauchard y Fernández, 2004). Los ID permiten comparar rodales de diferentes calidades y edades, estableciendo zonas de densidad equivalente en un amplio espectro de condiciones de crecimiento (Bravo *et al.*, 1997; Chauchard y Fernández, 2004).

Para facilitar su uso, los ID se presentan de manera gráfica dando origen a los diagramas de manejo de la densidad (DMD), los cuales permiten al silvicultor visualizar la condición de un rodal en particular y establecer de manera sencilla una o varias estrategias de manejo de la densidad (Daniel *et al.*, 1979; Navarro *et al.*, 2011). Los DMD son modelos gráficos que permiten caracterizar rendimiento, densidad y mortalidad mediante relaciones de densidad del rodal, diámetro, volumen y altura dominante (Gezan *et al.*, 2007; Valbuena *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2011); los DMDs se utilizan para tomar decisiones silvícolas que garanticen la óptima ocupación del sitio durante los estados de desarrollo o zonas de crecimiento, tales como crecimiento libre, crecimiento constante y zona de mortalidad inminente (Navarro *et al.*, 2011). También, son útiles para dar seguimiento a los tratamientos silvícolas y evaluar los resultados en términos de densidad, área basal, volumen promedio, diámetro cuadrático y altura dominante (Solomon y Zhang, 2002).

Los DMD se han construido con base en las relaciones funcionales que describen los ID propuestos por Hart (1928), Reineke (1933) y Yoda *et al.* (1963). En años recientes, los DMD han incorporado además, modelos de volumen y diámetro cuadrático, de manera tal que resultan una guía con cinco variables, incluyendo número de árboles, altura dominante, espaciamiento relativo, volumen y diámetro cuadrático (Barrio y Álvarez, 2005; Schnell *et al.*, 2012; Corral-Rivas *et al.*, 2015). Aunque estas relaciones

originalmente se desarrollaron para bosques coetáneos y puros, ya se han generado guías para bosques mixtos con base en los mismos principios (Puettmann *et al.*, 1993; Solomon y Zhang, 2002).

1.1. ÍNDICES DE DENSIDAD PARA MASAS FORESTALES

La densidad puede evaluarse en términos absolutos por unidad de superficie (área basal, número de árboles vivos, volumen), o de manera relativa utilizando índices que permitan establecer combinaciones de tamaño y número de árboles por unidad de superficie que representen condiciones de densidad equivalente. Dada la diversidad natural de un bosque, las medidas de densidad relativa cobran importancia con fines de manejo. Las medidas de densidad absoluta y relativa usadas de manera conjunta permiten además, estimar el grado de competencia de un rodal forestal (Bravo *et al.*, 1997; Torres y Magaña, 2001) y las medidas de densidad relativa se han diseñado para describir el grado de ocupación de un rodal relativo a una condición estándar o de referencia (Torres-Rojo y Velázquez-Martínez, 2000; Torres y Magaña, 2001).

Hart (1928), Reineke (1933) y Yoda *et al.* (1963) desarrollaron sus índices de forma tal que estos fueran “independientes” de la calidad de sitio y de la edad del rodal; buscaron ofrecer una medida sencilla y simple para guiar al silvicultor o en su caso explicar la mortalidad natural debida a la competencia intraespecífica. Si se tienen dos rodales con la misma densidad relativa pero con condiciones de crecimiento diferente, corresponde al silvicultor la decisión sobre la frecuencia e intensidad de los aclareos. Aunque estos índices se generaron para bosques coetáneos y homogéneos, pueden ser aplicables a bosques mezclados y heterogéneos dado que el espacio de crecimiento

es finito, que puede ser ocupado por más de una especie en cantidades limitadas en función del tamaño de los árboles.

1.1.1. ÍNDICE DE DENSIDAD RELATIVA

Este índice fue propuesto por Reineke (1933), como resultado de los diversos trabajos que desarrolló con 14 especies arbóreas de América del Norte, que provenían de bosques puros o casi puros y totalmente poblados (Bravo *et al.*, 1997; Woodall *et al.*, 2005). Encontró que en rodales con presencia de mortalidad por competencia intra-específica y cerca de su densidad máxima, hay una relación entre el número de árboles por acre (hectárea en el sistema métrico decimal) con el diámetro cuadrático (Dq), expresado mediante la siguiente relación alométrica:

$$NA = \alpha_0 \times Dq^{\alpha_1} \quad (1)$$

O en su forma lineal:

$$\log_{10}(NA) = \alpha_0 + \alpha_1 \times \log_{10}(Dq) \quad (2)$$

Donde: \log_{10} es el logaritmo natural base 10; NA es el número de árboles por hectárea; Dq es el diámetro cuadrático en cm; α_0 y α_1 son parámetros a estimar.

La ecuación anterior define cómo la cantidad de individuos en una masa forestal disminuye a medida que estos aumentan sus dimensiones. Cuando se tienen datos provenientes de rodales “completamente ocupados” se obtiene la línea de referencia que representa el comportamiento de la densidad máxima posible. Reineke (1933) menciona que la pendiente de esta recta (α_1) se puede asumir como una constante igual a -1.605

para una gama amplia de especies y calidades de estación, mientras que el término independiente α_0 varía con respecto a la especie (Bravo *et al*, 1997; Zeide, 2005).

Dado que el modelo describe la relación tamaño promedio-densidad en rodales de máxima ocupación, es posible caracterizar al resto de los rodales a partir de la misma. Es fácil ver que si remplazamos a NA (un número de árboles) por el índice de densidad relativa de Reineke (IDR) a un diámetro de referencia (Dr) el modelo quedaría como sigue:

$$IDR = \alpha_0 \times Dr^{\alpha_1} \quad (3)$$

Si lo que se intenta es comparar la densidad máxima contra cualquier otra, entonces, una proporción directa de ambas expresiones sería adecuada.

$$\frac{IDR}{NA} = \frac{\alpha_0 \times Dr^{\alpha_1}}{\alpha_0 \times Dq^{\alpha_1}} \quad (4)$$

Simplificando

$$IDR = NA \times \left(\frac{Dr}{Dq}\right)^{\alpha_1} \quad (5)$$

El índice de densidad de rodales de Reineke se calcula para un diámetro cuadrático promedio de 10 pulgadas (o su equivalente en el sistema métrico decimal de 25.4 cm).

$$IDR = NA \times \left(\frac{25.4}{Dq}\right)^{\alpha_1} \quad (6)$$

Es decir, el IDR queda definido por el número de árboles que un rodal tiene a un diámetro cuadrático de 25.4 cm o 10 pulgadas. Este diámetro es solo un valor de referencia, por lo que puede ser cualquier otro que el silvicultor determine (Clutter *et al.*, 1983; Torres y Magaña, 2001; Shaw y Long, 2007). Lo opuesto es también posible, esto es, una vez que se ha determinado el IDR de un rodal y se desea saber la cantidad de árboles residuales a dejar para un IDR , basta con despejar de la fórmula el valor de NA

y aplicar el valor de IDR deseable así como el Dq (este último dependerá del tipo de aclareo).

1.1.2. LEY DEL AUTO-ACLAREO O DE YODA

La ley de auto-aclareo o ley de los $-3/2$ se le atribuye a Yoda *et al.* (1963). Sin embargo, se derivó de diversos estudios realizados por investigadores japoneses sobre la densidad de plantas por unidad de superficie, principalmente con herbáceas (Shinozaki y Kira, 1956). Observaron que a bajas densidades apenas si existía mortalidad pero conforme aumentaba el tamaño de las plantas, algunas empezaban a morir, hasta alcanzar un nivel en donde la relación entre el número de plantas por unidad de superficie y el tamaño de la planta permanece constante (Bravo *et al.*, 1997). Por medio de esta relación se intenta explicar la mortalidad que ocurre en los bosques naturales que se encuentran en competencia, y parte de características del rodal que vinculan de manera lineal una función que corresponde al tamaño y otra relacionada con la densidad del rodal (Chauchard y Fernández, 2004).

Yoda *et al.* (1963) encuentran que existe una relación matemática entre el peso promedio (o volumen promedio) de un rodal con el número máximo de individuos vivos en el mismo, considerando a un rodal bien poblado y una edad específica; denominaron a esta relación como “Ley de Autoaclareo o Ley de los $-3/2$ ”, y se define como una recta con pendiente de esta función cercana a un valor de -1.5 , y el intercepto es específico de cada especie e independiente de las condiciones del sitio (Hibbs, 1987; Chauchard *et al.*, 1999; Zeide, 2005).

La relación matemática queda expresada como sigue:

$$Vp = \beta_0 \times NA^{-3/2} \quad (7)$$

O linealizada con logaritmos base 10

$$\log_{10}(Vp) = \beta_0 - 3/2 \times \log_{10}(NA) \quad (8)$$

Donde Vp es el volumen promedio en metros cúbicos (m^3), β_0 define el valor máximo en volumen a medida que un solo individuo ocupa la totalidad del sitio y representa una medida de la densidad máxima, NA es el número de individuos por unidad de superficie y $-3/2$ es una constante independiente de la especie, lugar, edad, densidad inicial y calidad de sitio.

1.1.3. ESPACIAMIENTO RELATIVO O ÍNDICE DE HART

El índice de espaciamiento relativo (ER) se utiliza para caracterizar el crecimiento de un rodal, y aunque fue propuesto inicialmente por Hart en 1928 para plantaciones forestales, es en 1954 cuando Bekkius lo refiere como un índice (López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009). De acuerdo con Zhao *et al.* (2010) y, Burkhart y Tomé (2012) este índice considera la distancia media entre árboles y la altura media dominante del rodal. Asumiendo un espaciamiento cuadrado, la distancia entre árboles se calcula mediante la siguiente expresión:

$$ER \% = \frac{\sqrt{10000/NA}}{H} \quad (9)$$

Donde H es altura dominante expresada en metros, NA es el número de árboles por hectárea y ER se refiere al espaciamiento relativo en porcentaje.

En masas coetáneas jóvenes el espaciamiento relativo disminuye rápidamente hasta estabilizarse en un límite inferior; después de alcanzar este límite, el ER aumenta de manera proporcional con la edad y altura promedio del rodal, como resultado del efecto de la mortalidad inducida por la competencia (Burkhart y Tomé, 2012). Así, la mortalidad y el espaciamiento relativo están altamente correlacionados, y a menor espaciamiento

mayor será la mortalidad que está afectada por la edad, la especie y las condiciones del sitio (Patiño, 1995).

El límite inferior del ER es constante para una especie determinada, y es independiente de la calidad de sitio y de la densidad inicial. Se considera que está relacionado con el índice de densidad del rodal (IDR). Curtis (1970) encontró que si la altura es proporcional al diámetro elevado a una potencia de 0.8 entonces.

$$H = a \times d^{0.8} \quad (10)$$

Asumiendo que la altura dominante del rodal está relacionada con el diámetro cuadrático (Dq) en la función anterior, en la Ecuación 9 la H puede ser sustituida por $d^{0.8}$, como se muestra en la siguiente relación:

$$ER \% = \frac{NA^{1/2} \times \sqrt{b}}{a \times Dq^{0.8}} \quad (11)$$

Donde b es una constante que puede ser 10,000 cuando se considera que los árboles tienen un espaciamiento cuadrado o $10,000/k$ para otro arreglo espacial. Despejando de esta ecuación a NA se tiene entonces

$$ER \% = \frac{b^{0.5}/NA^{0.5}}{a \times Dq^{0.8}} \quad (12)$$

$$NA^{0.5} = \frac{b^{0.5}}{a} \times ER^{-1} \times Dq^{-0.8} \quad (13)$$

$$NA = \frac{b}{a^2} \times ER^{-2} \times Dq^{-1.6} \quad (14)$$

Si el ER está cerca del límite inferior (máxima ocupación) se puede asumir como constante, los términos $\frac{b}{a^2} \times ER^{-2}$ representan este valor asintótico inferior que tiende a ser constante (K), y la relación queda como:

$$NA = K \times Dq^{-1.6} \quad (15)$$

Entonces, a partir del espaciamiento relativo es posible derivar la relación de Reineke

para máxima ocupación a partir de la relación alométrica básica de diámetro-altura (Bravo *et al.*, 1997; Burkhart y Tomé, 2012).

1.2. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD: COMPONENTES Y USOS

Los diagramas de manejo de la densidad (DMD) son herramientas gráficas que permiten determinar los niveles adecuados de existencias a mantener en cada estado de desarrollo del rodal, el cual es un proceso complejo que involucra factores de tipo biológico y técnico, y son específicos para el manejo de una situación particular (Sales y Fonseca, 2004; Castedo-Dorado *et al.*, 2009; Schnell *et al.*, 2012).

Los DMDs reflejan fundamentalmente relaciones que involucran el tamaño de los individuos, la densidad del rodal (número de árboles por unidad de superficie), ocupación del sitio y el autoaclareo. Se desarrollan utilizando los principios de Reineke, Yoda o de Hart (Gezan *et al.*, 2007; Vacchiano *et al.*, 2013). Los principales componentes de los DMDs son la densidad (número de árboles por unidad de superficie), diámetro cuadrático promedio, volumen promedio y altura dominante, y van a depender del tipo de índice que se elija para desarrollarlo (Newton, 1997; Valbuena *et al.*, 2008).

El uso común de los DMDs radica en la implementación de los regímenes silvícolas; sin embargo, su aplicación es diversa. Gómez-Vázquez *et al.* (2014) recurren al uso de los diagramas de manejo de la densidad para determinar los niveles óptimos de densidad para prevenir los incendios forestales en bosques de *Pinus pinaster* en Galicia y Asturias, España. En general, los DMD tienen un amplio campo de aplicación para la programación de prescripciones silvícolas diversas. En el presente trabajo se utilizaron los principios de los índices de densidad descritos en párrafos anteriores para obtener la

línea de densidad máxima y para generar los diagramas de manejo de la densidad que puedan ser utilizados tanto en bosques puros como mezclados de San Pedro el Alto.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar guías de densidad para masas mezcladas de la comunidad de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Obtener las líneas de densidad máxima para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca a nivel absoluto y con proporciones de especies, utilizando los modelos propuestos por Reineke y Yoda.
- ii. Generar DMDs en función de las estimaciones de la línea de densidad máxima.
- iii. Desarrollar DMDs que consideren la presencia de diversas especies con el espaciamiento relativo.

1.4. LITERATURA CITADA

Barrio A., M. and J. G. Álvarez G. 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry* 78: 209-216.

Bravo, F., G. Montero y M. del Rio. 1997. Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología* 11: 177-187.

Burkhardt, H. E. and M. Tomé. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer. Dordrecht Heidelberg, New York, London. 457 p.

- Castedo-Dorado, F., F. Crecente-Campo, P. Álvarez-Álvarez and M. Barrio-Anta. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82: 1-16.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister and R. L. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Krieger Publishing Company, New York, USA. 333 p.
- Corral-Rivas, S., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas, C. Wehenkel y C. A. López-Sánchez. 2015. Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México. *Bosque* 36: 409-421.
- Curtis, R. O. 1970. Stand density: an interpretation. *Forest Science* 16: 403-414.
- Chauchard, L. M. y M. O. Fernández. 2004. Diagramas de manejo de la densidad de masas de pino radiata en el país Vasco. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 18: 161-166.
- Chauchard, L., R. Sbrancia, M. González, L. Maresca y A. Rabino. 1999. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$ o ley de autorraleo. *Bosque* 20: 79-94.
- Daniel, T. W., J. A. Helms and F. S. Baker. 1979. *Principles of silviculture*. Second Edition. McGraw-Hill. New York, USA. 500 p.
- De los Santos-Posada, H. M., J. R. Valdez-Lazalde and J. M. Torres-Rojo. 2015. San Pedro el Alto community forest, Oaxaca, Mexico. In: *Forest plans of North America*.

- Siry, J. P., P. Bettinger, K. Merry, D. L. Grebner, K. Boston and C. Creszewski. (eds.). Academic Press. London, Reino Unido. pp: 199-208.
- Dean, T. J. and Jr. V. C. Baldwin. 1993. Using a density management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. Research Paper SO-275. New Orleans, LA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station. 7 p.
- Gezan, S. A., A. Ortega y E. Andenmatten. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 28: 97-105.
- Gómez-Vázquez, I., P. M. Fernandes, M. Arias-Rodil, M. Barrio-Anta and F. Castedo-Dorado. 2014. Using density management diagrams to assess Crown fire potential in *Pinus pinaster* Ait. stands. *Annals of Forest Science* 71: 473-484.
- Hart, H. M. J. 1928. Stem density and thinning: pilot experiment to determine the best spacing and thinning method of teak. Proefsta. Boschwesen, Batavia, Meded. 21.
- Hibbs, D. E. 1987. The self-thinning rule and red alder management. *Forest Ecology and Management* 18: 273-281.
- López-Sánchez, C. and R. Rodríguez-Soalleiro. 2009. A density management diagram including stand stability and Crown fire risk for *Pseudotsuga mensiesii* (Mirb.) Franco in Spain. *Mountain Research and Development* 29: 169-176.
- Musálem, M. Á. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Taller de Impresión Santos. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México. 213 p.

- Navarro C., C., M. A. Herrera., F. Drake A. y P. J. Donoso. 2011. Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. *Bosque* 32: 175-186.
- Newton, P. F. 1997. Stand density management diagrams: review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management* 98: 251-265.
- Patiño V., F. 1995. El espaciamiento en plantaciones forestales. *Revista Ciencia Forestal en México* 20: 67-99.
- Puettmann, K. J., D. W. Hann and D. E. Hibbs. 1993. Evaluation of the size-density relationships for pure red alder and Douglas-fir stands. *Forest Science* 39: 7-27.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Sales L., J. F. and T. F. Fonseca. 2004. The allometric model in the stand density management of *Pinus pinaster* Ait. in Portugal. *Annals of Forest Science* 61: 807-814.
- Schnell, S., C. Kleinn and J. G. Álvarez G. 2012. Stand density management diagrams for three exotic tree species in smallholder plantations in Vietnam. *Small-scale Forestry* 11: 509-528.

- Shaw, J. D. and J. N. Long. 2007. A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat. *Southern Journal of Applied Forestry* 31: 28-38.
- Shinozaki, K. and T. Kira. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. *Journal of the Institute of Polytechnics* 12: 69-82.
- Solomon, D. S. and L. Zhang. 2002. Maximum size-density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA. *Forest Ecology and Management* 155: 163-170.
- Torres R., J. M., y O. S. T. Magaña. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Limusa. México, D.F. 472 p.
- Vacchiano, G., R. Justin D., J. D. Shaw, M. Svoboda and R. Motta. 2013. A density management diagram for Norway spruce in the temperate European montane region. *European Journal of Forest Research* 132: 535-549.
- Valbuena, P., C. del Peso and F. Bravo. 2008. Stand density management diagrams for two mediterranean pine species in Eastern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 17: 97-104.
- Vincent, L., A. Y. Moret y M. Jerez. 2000. Comparación de algunos regímenes de espesura en plantaciones de teca en el área experimental de la reserva forestal de Caparo, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 44: 87-95.
- Woodall, C. W., P. D. Miles and J. S. Vissage. 2005. Determining maximum stand density index in mixed species stands for strategic-scale stocking assessments. *Forest Ecology and Management* 216: 367-377.

Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa and K. Hozumi. 1963. Self-thinning in Overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI). *Journal of Biology* 14: 107-129.

Zeide, B. 2005. How to measure stand density. *Trees* 19: 1-14.

Zhao, D., M. Kane and B. E. Bordes. 2010. Development and applications of the relative spacing model for loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 259: 1922-1929.

CAPÍTULO II

DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDAD PARA BOSQUES MEZCLADOS DE SAN PEDRO EL ALTO, ZIMATLÁN, OAXACA

2.1. RESUMEN

Los diagramas de manejo de la densidad (DMDs) son modelos gráficos que reflejan la relación entre tamaño, densidad y competencia; permiten determinar los niveles adecuados de las existencias a mantener en cada estado de desarrollo de un rodal o grupo de rodales. En este estudio, se generaron DMDs para bosques mezclados con el índice de densidad relativa de Reineke (IDR) y con el índice de densidad de Yoda (IDY). Los modelos utilizados fueron el de Reineke y el de Yoda mediante regresión de frontera estocástica (RFE) y mínimos cuadrados ordinarios (MCO). Para el ajuste se usaron datos de 945 sitios de inventario de 1000 m², muestreados en 2013 y 2014. El ajuste de los modelos con MCO y RFE se hizo con los 190 sitios más densos. Los enfoques con MCO y RFE en la formas exponencial y semi-normal estimaron una misma línea de densidad máxima absoluta tanto para el modelo de Reineke como con el modelo de Yoda. Esto muestra que la línea de densidad máxima es difícil de estimar aún con RFE, sobre todo en bosques con mezcla de especies. El uso del modelo modificado de Reineke para bosques mezclados sugiere que en la mezcla existen diferentes grados de tolerancia a la sombra, siendo el grupo más tolerante el grupo de especies del género *Quercus*. Entonces, cuando se tiene un bosque mezclado es relevante estimar el número de árboles por ha con las proporciones de grupos de especies presentes por las necesidades silvícolas particulares de las especies, es decir, los índices de densidad

deben considerar el nivel de tolerancia a la sombra de las especies para la planeación de los aclareos en los diferentes estados de desarrollo del rodal.

Palabras clave: autoaclareo, bosque mezclado, índices de densidad, regresión de frontera estocástica.

DENSITY MANAGEMNT DIAGRAMS FOR MIXED FORESTS AT SAN PEDRO EL ALTO, OAXACA

2.2. ABSTRACT

Density management diagrams (DMDs) are graphical representations of the relation size, number of individuals (absolute density) and space competition. They being widely used to determine adequate stoking levels at every stand development stage. In this study DMDs were developed for mixed stands using the Reineke density index (RDI) and the self-thinning law expressed as the Yoda density index (YDI). The fitting for both approaches included the used or ordinary least squares (OLS) and stochastic frontier regression (SFR). Data from 945 plots of 1000 m² measured in a managed mixed forest sampled in 2013 and 2014 were used. Only the 20% of the densest plots was used to define the maximum density relationship. The results suggest that when data are close to the frontier OLS and SFR produced similar results, particularly on mixed stands. The Reineke group-species approach suggests that in the mixed forest is possible to distinguish several degrees of shade tolerance being the oaks the most tolerant. Hence, when managing a mixed forest the shade-tolerance of the mix has to be taken into account together with the production objectives to best manage density based on the stand development stage.

Key words: self-thinning, mixed forest, density index, stochastic frontier regression.

2.3. INTRODUCCIÓN

La programación de aclareos durante la vida de un rodal es una actividad crítica del trabajo del gestor forestal o silvicultor, quien considera información derivada de los índices de densidad (ID) para realizar esto de forma eficiente desde la perspectiva silvícola, ecológica y económica. Los ID permiten de manera sencilla estimar la ocupación del sitio y sugerir si un rodal o unidad de manejo requiere de un aclareo para liberar espacio de crecimiento. También, los ID son útiles para definir la intensidad del aclareo en términos de área basal residual, volumen a remover y número de árboles a dejar en pie (Navarro *et al.*, 2011; Hernández *et al.*, 2013).

Si bien a través del uso de los ID, un rodal puede conducirse a objetivos determinados de producción maderable, estos pueden también utilizarse como indicadores de problemas potenciales, tales como susceptibilidad al ataque de insectos, daños por viento o riesgo a incendio, así como indicadores en la provisión de hábitat para algunas especies animales (aves, por ejemplo) (Anhold *et al.*, 1996; Long y Shaw, 2005; Shaw y Long, 2007; López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009; Vacchiano *et al.*, 2013). Con el análisis de la relación entre el número de árboles por unidad de superficie y el tamaño promedio, se puede explorar la dinámica del bosque, en particular el autoaclareo, (*i.e.* mortalidad, como producto de la competencia), y desarrollar índices de densidad relativa (Newton, 1997; Torres-Rojo y Velázquez-Martínez, 2000; Reyes-Hernández *et al.*, 2013). El límite superior de la línea de densidad (tamaño-densidad), es utilizado para definir el número máximo de individuos que pueden crecer en sitios con condiciones particulares. Una relación ampliamente usada por los forestales para conocer el nivel de densidad de un bosque, es el índice

de densidad relativa de Reineke (IDR) (Reineke, 1933), este índice se obtiene de una relación alométrica para la evolución del número de árboles por hectárea (NA) en función del diámetro cuadrático (Dq), y está dada por:

$$NA = \alpha_0 \times Dq^{\alpha_1} \quad (1)$$

Donde NA es el número de árboles por hectárea, Dq es el diámetro cuadrático promedio, α_0 y α_1 son el intercepto y la pendiente de la línea ajustada.

Reineke (1933) consideró un diámetro de referencia de 25.4 cm para definir el IDR, de tal forma que el índice se expresa como el número de árboles de diámetro igual al de referencia, equivalentes a los individuos presentes en un rodal con un Dq determinado ($IDR = \alpha_0 \times 25.4^{\alpha_1}$). Si se considera a la Ecuación 1, se deduce que $\alpha_0 = NA \times Dq^{-\alpha_1}$, y al sustituir α_0 en IDR se obtiene la expresión siguiente:

$$IDR = NA \times \left(\frac{25.4}{Dq}\right)^{\alpha_1} \quad (2)$$

Donde IDR es el índice de densidad de Reineke, 25.4 es el diámetro cuadrático de referencia, Dq es el diámetro cuadrático promedio del rodal y α_1 es la pendiente con valor de -1.605.

Otra relación que se utiliza en el área forestal, aunque derivada en el estudio de plantas diversas (maíz, pastos y otros), es la propuesta por Shinozaki y Kira (1956) y posteriormente nombrada a raíz del trabajo de Yoda *et al.* (1963) como ley del autoaclareo. Al principio se utilizó la relación peso-densidad pero, en términos forestales la ley utiliza la relación volumen promedio (Vp) y densidad (NA) (Chauchard *et al.*, 1999), y tiene la expresión siguiente:

$$Vp = \beta_0 \times NA^{\beta_1} \quad (3)$$

Con la Ecuación 3, se puede también derivar un índice, generalmente reportado como índice de densidad de Yoda (IDY) (Santiago-García *et al.*, 2013). El IDY toma como referencia a 100 individuos por ha para el cálculo en función del Vp.

$$IDY = Vp \times \left(\frac{100}{NA}\right)^{\beta_1} \quad (4)$$

A partir de estas relaciones es posible construir DMDs, los cuales son herramientas gráficas que permiten determinar los niveles adecuados del número de árboles, área basal o volumen a mantener en cada estado de desarrollo del rodal (Castedo-Dorado *et al.*, 2009; Schnell *et al.*, 2012). Diversos investigadores han desarrollado DMDs, basados en las líneas de densidad máxima que se obtienen con el IDR e IDY máximos, para una sola especie. Por ejemplo, Chauchard y Fernández (2004) generaron un DMD para *Pinus radiata* en España, utilizaron el modelo de Reineke para la estimación de la línea de densidad máxima y reportaron una pendiente de -1.899; Shaw y Long (2007) también generaron un DMD para *P. palustris*, con el valor propuesto por Reineke (-1.605), y el objetivo fue de utilizar el DMD para planear las intervenciones silvícolas y dar seguimiento a las respuestas de las intervenciones. Santiago-García *et al.* (2013) generaron un DMD para *P. patula* en Hidalgo, el cual se basó en el IDR e IDY; en el caso del IDR reportaron un valor de -1.747 para la pendiente, mientras que para el IDY el valor de la pendiente fue de -1.303. El valor de la pendiente propuesto por Reineke y Yoda *et al.* varía en función de la especie y las condiciones de crecimiento específicas en un sitio o rodal (Chauchard *et al.*, 1999; Zeide, 2005). Para que los modelos de densidad sean herramientas eficientes es necesario estimar los parámetros de los modelos a partir de los datos específicos de cada región (Gezan *et al.*, 2007).

Los DMDs han sido desarrollados con preferencia para masas puras coetáneas (Solomon y Zhang, 2002); sin embargo, el interés reciente por incorporar otros aspectos como parte de las prescripciones silvícolas, (e.g. la conservación de la biodiversidad, hábitat para la vida silvestre, entre otros), lleva al investigador forestal a generar herramientas que le permitan manejar niveles de complejidad mayores (Solomon y Zhang, 2002). En este caso, un DMD se puede construir para más de una especie a la vez o mezclas de especies que comparten el espacio de crecimiento, lo que, hace necesario considerar los requerimientos de cada una de las especies que interactúan en un sitio específico (Puettmann *et al.*, 1992; Torres-Rojo y Velázquez-Martínez, 2000). En México la mayor parte de actividades de manejo con fines de producción maderable se realiza en bosques naturales con mezclas de especies (Caballero, 2010); y si el manejo que se pretende considera la gran diversidad y mezcla de especies, es necesario desarrollar herramientas que faciliten la aplicación de tratamientos silvícolas y que permitan aprovechar al máximo el potencial productivo de estos bosques mezclados.

En términos de la ocupación del espacio total disponible en el sitio forestal, existen ventajas al manejar una masa mezclada. Por ejemplo, la co-existencia de especies de árboles con diferentes grados de tolerancia a la sombra, puede generar que estas utilicen de manera más eficiente el espacio de crecimiento (del Amo, 1985). De esta forma, mientras que la especie más intolerante ocupa el sitio de manera más rápida, la tolerante puede crecer a un ritmo más lento, pero en un nicho mucho más adecuado para su biología, por lo que la biomasa total de ambas por unidad de superficie podría ser superior a tener una masa pura de ambas (Puettmann *et al.*, 1992; Soto *et al.*, 2010).

En este sentido, para auxiliar en el manejo de masas mezcladas a partir de un ID, Torres-Rojo y Velázquez-Martínez (2000) plantearon una modificación al modelo de Reineke, para obtener las líneas de densidad máxima para bosques mixtos. Este enfoque considera a la proporción de especies o en su caso grupos de especies presentes en un espacio específico. Lo anterior se realiza mediante la estimación de un número estándar de árboles (NEA) que está en función de una especie base (Eb); en este enfoque se considera la mezcla de especies y el diagrama puede usar diferentes hipótesis ya sea que se considere una pendiente o que cada especie tenga una pendiente particular.

De manera alterna al enfoque de Torres-Rojo y Velázquez-Martínez (2000), es considerar que un rodal mezclado debe manejarse como un todo y que las proporciones de las especies solo son relevantes en términos de la ocupación total. El índice propuesto por estos autores, se derivó a partir de rodales mezclados del norte de México, que incluyen especies de pino y encino en varias proporciones, aunque solo se usaron los valores de densidad absoluta para establecer la línea de densidad máxima.

El presente estudio se realizó para los bosques de la comunidad de San Pedro el Alto, Oaxaca, la cual ha sido reconocida a niveles nacional e internacional por las prácticas silvícolas que realiza desde 1984, mediante la certificación de 21,095.85 ha de bosque de pino-encino y selva baja caducifolia (Barton y Merino, 2004; Rosas-Baños y Lara-Rodríguez, 2013). Debido a que una de las principales filosofías de gestión forestal que la comunidad posee, es la de manejar los rodales bajo esquemas que permitan y promuevan los bosques mezclados, en este trabajo se plantearon los

objetivos siguientes: 1) obtener las líneas de densidad máxima para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca, a nivel absoluto y con proporciones de especies, utilizando los modelos propuestos por Reineke y Yoda y 2) generar DMDs en función de las estimaciones de la línea de densidad máxima.

2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

2.4.1. ÁREA DE ESTUDIO Y FUENTE DE INFORMACIÓN

La comunidad de San Pedro el Alto, se localiza en el municipio de Zimatlán de Álvarez, Oaxaca, entre las coordenadas 16° 35' 13" y 16° 50' 18" de latitud norte y 97° 00' 56" y 97° 12' 22" de longitud oeste (De los Santos-Posadas *et al.*, 2015). Los datos utilizados en este trabajo provienen de un inventario estratégico que la comunidad llevó a cabo en 26,900 ha de bosque, de 2013 a 2014. En total, se establecieron 1,110 sitios temporales de 1000 m² de superficie, aunque para este estudio se utilizaron datos provenientes de 945 sitios. Al tratarse de un bosque natural, en la zona se registra la presencia de varias especies de coníferas, entre las que destaca el género *Pinus* con: *Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. Ex Schltld., *P. douglasiana* Martínez, *P. lawsonii* Roehl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Gordon & Glend., *P. oocarpa* Schiede ex Schltld., *P. patula* Schltld. & Cham., *P. pringlei* Shaw, *P. pseudostrobus* Gordon & Glend., *P. teocote* Schltld. & Cham. además de *Abies oaxacana* Mart, *Cupressus spp.*, *Arbutus spp.*, *Alnus spp.*, *Quercus spp.* y otras latifoliadas.

En este estudio se utilizó el número de árboles vivos (N), el diámetro normal (DN, cm) y la altura total (AT, m), para obtener las variables dasométricas necesarias en el ajuste de las Ecuaciones 1 y 3. Con las variables individuales mencionadas se calcularon las variables a nivel rodal, tales como: área basal (AB, m² ha⁻¹), número de árboles por

hectárea (NA, árboles por hectárea), volumen (V, m³ ha⁻¹) y diámetro cuadrático (Dq, cm) que se estimó con la expresión siguiente:

$$Dq = \sqrt{\frac{40000}{\pi} \times \frac{AB}{NA}} \quad (5)$$

2.4.2. ESTIMACIÓN Y ANÁLISIS DE LA DENSIDAD MÁXIMA EN BOSQUES MEZCLADOS

El análisis de la densidad máxima de los bosques mezclados se hizo utilizando dos enfoques:

Enfoque 1. Densidad absoluta máxima: en este enfoque, los datos de los sitios se analizaron como una masa total en términos absolutos, sin hacer distinción de la composición ni de la proporción de las especies con las formas lineales del modelo de Reineke o Yoda (Ecuaciones 6 y 7). El supuesto es relativamente sencillo, en cualquier masa forestal el elemento limitante es el espacio de crecimiento, por lo que manejar la masa como un todo implica aumentar el espacio de crecimiento para las especies presentes, en términos prácticos la composición de las especies presentes en los rodales la seleccionará el silvicultor en función del objetivo de manejo. En los rodales con ocupación máxima, se espera que el valor del parámetro α_0 de la Ecuación 6 o β_0 de la Ecuación 7 represente el límite superior máximo de cualquier proporción de mezcla de especies posibles.

$$\log(NA) = \alpha_0 + \alpha_1 \times \log(Dq) + \varepsilon \quad (6)$$

$$\log(Vp) = \beta_0 + \beta_1 \times \log(NA) + \varepsilon \quad (7)$$

Donde \log es el logaritmo base 10, ε es el término de error en el modelo ($\varepsilon \sim iiN(0, \sigma_\varepsilon^2)$), las demás variables y parámetros ya fueron descritas.

Enfoque 2. Densidad máxima con proporciones de especies: este enfoque fue propuesto por Torres-Rojo y Velázquez-Martínez (2000), en este caso, las especies se agruparon y la densidad máxima se obtuvo en términos de un grupo de especies al que se le denominó especie base (Eb). Así, los grupos para el bosque mezclado se definieron mediante los criterios siguientes: 1) **Grupo *Pinus***: en el cual se encuentran todas las especies del género *Pinus*, si bien, se tienen diferentes especies que van de intolerantes a la sombra como *Pinus douglasiana* Martínez, *P. lawsonii* Roezl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Gordon & Glend., *P. oocarpa* Schiede ex Schltdl., *P. pringlei* Shaw, *P. teocote* Schltdl. & Cham. a las semitolerantes como *P. patula* Schltdl. & Cham. y *P. pseudostrubus* Gordon & Glend. y, tolerantes como *P. ayacahuite* C. Ehrenb. Ex Schltdl. Sin embargo, el equipo técnico encargado de este bosque lo ha manejado como un solo grupo: 2) **Grupo *Quercus***: en el que se usó el mismo criterio que para *Pinus*; si bien, la riqueza de encinos es considerable, se requieren trabajos adicionales para la determinación taxonómica correcta de las especies y para la identificación de las necesidades silvícolas particulares; 3) **Grupo latifoliadas**: que se destinó para las latifoliadas que no pertenecen al género *Quercus* y 4) **Grupo otras coníferas**: que representa a los géneros *Abies* y *Cupressus*; si bien, estos dos géneros son relativamente poco abundantes comparados con las especies de *Pinus* y se encuentran confinados a zonas específicas dentro de la región, también se les encuentra como componentes en rodales con manejo más intensivo. La tolerancia a la sombra es mayor comparado con algunas especies de *Pinus*, por lo que fue uno de los criterios principales para agruparlos.

Con los grupos se obtuvo el número de árboles (Ecuación 8) que considera la misma pendiente para los grupos y con la Ecuación 9 que sugiere que cada grupo de especies tiene una pendiente particular.

$$\log(NA) = [(\alpha_1 \times PS_P) + (\alpha_2 \times PS_Q) + (\alpha_3 \times PS_L) + (\alpha_4 \times PS_O)] + \beta \times \log(Dq_w) \quad (8)$$

$$\log(NA) = [(\alpha_1 \times PS_P) + (\alpha_2 \times PS_Q) + (\alpha_3 \times PS_L) + (\alpha_4 \times PS_O)] + [(\beta_1 \times PS_P) + (\beta_2 \times PS_Q) + (\beta_3 \times PS_L) + (\beta_4 \times PS_O)] \times \log(Dq_w) \quad (9)$$

Donde PS_P representa la proporción del grupo *Pinus*, PS_Q es la proporción de *Quercus*, PS_L proporción de latifoliadas, PS_O es la proporción de otras coníferas, α_i y β_i son los parámetros del modelo en tanto que, Dq_w hace referencia al diámetro cuadrático promedio ponderado por grupo y se estima con la Ecuación 10:

$$Dq_w = (Dq_P \times PS_P) + (Dq_Q \times PS_Q) + (Dq_L \times PS_L) + (Dq_O \times PS_O) \quad (10)$$

Donde Dq_P es el diámetro cuadrático del grupo *Pinus*, Dq_Q diámetro cuadrático del grupo *Quercus*, Dq_L diámetro cuadrático de latifoliadas y Dq_O es el diámetro cuadrático del grupo de otras coníferas.

El número de árboles que se obtuvo con las Ecuaciones 8 y 9 consideran las proporciones de los grupos de especies. Sin embargo, estimar el índice de densidad relativa de un bosque mezclado con la Ecuación 2 sería incorrecto porque no se consideran las proporciones de los grupos ni el espacio máximo de ocupación por especie. Para poder calcular el índice de densidad relativa de la mezcla (IDR_M), se estima un número estándar de árboles (NEA) que a su vez está en función de una especie base. Si se supone que el NA de la especie base se puede estimar con la Ecuación 11 en tanto que la línea de densidad máxima para la mezcla de especies está representado por la Ecuación 12.

$$\log(NA_B) = \alpha_B + b \times \log(Dq) \quad (11)$$

$$\log(NA_M) = \alpha' + \beta' \times \log(Dq) \quad (12)$$

Donde NA_B es el número de árboles por hectárea de la especie base, NA_M hace referencia al número máximo de individuos del bosque mezclado; α_B , α' , β' y b son parámetros del modelo.

Ahora bien, si se considera un rodal muestreado con una mezcla (NA_S) y tamaño promedio particular, queda representado por Ecuación 13 y el NEA con Ecuación 14.

$$\log(NA_S) = \alpha'' + \beta'' \times \log(Dq) \quad (13)$$

$$\log(NEA) = \alpha + \beta \times \log(Dq) \quad (14)$$

Al establecer una relación proporcional entre las líneas de densidad máxima de 11, 12, 13 y 14 con sus respectivos intercepto y asumiendo que la pendiente de la línea de densidad máxima de la especie base es la misma que la de la mezcla en la muestra, el NEA se calcula con la Ecuación 15 y el IDR_M con Ecuación 16.

$$\log(NEA) = \left[\frac{\alpha_1}{(\alpha_1 \times PS_P + \alpha_2 \times PS_Q + \alpha_3 \times PS_H + \alpha_4 \times PS_O)} \right] \times [\log(NA_S) - \beta' \times \log(Dq)] + \beta \times \log(Dq) \quad (15)$$

$$IDR_M = NEA \left(\frac{Dq_B}{Dq} \right)^\beta \quad (16)$$

Donde NEA indica un número equivalente de árboles con respecto al grupo de *Pinus* (α_1) (Torres-Rojo y Velázquez-Martínez, 2000).

2.4.3. MÉTODOS DE AJUSTE DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA

Para el primer enfoque, el ajuste de las Ecuaciones 6 y 7 se hizo con el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y se utilizaron datos provenientes de una selección de sitios con valores mayores de IDR e IDY donde se han detectado densidades

cercanas al máximo. Esta forma de ajustar las zonas de densidad máxima es bastante común pero se considera que es un criterio subjetivo y muy dependiente de la muestra disponible y puede llevar a subestimar la zona verdadera del autoclareo (Zhang *et al.*, 2005). Además de MCO se utilizó regresión de frontera estocástica (RFE), una de sus bondades es que permite el uso de todas las observaciones disponibles de la relación densidad-tamaño (Figura 1) para las ecuaciones 17 y 18 (Aigner *et al.*, 1977; Zhang *et al.*, 2005). Estos dos enfoques de modelación fueron utilizados debido a la variabilidad de los datos en términos de densidad, ya que se tienen sitios desde 20 hasta 2,140 árboles por hectárea.

$$\log(NA) = \alpha_0 + \alpha_1 \times \log(Dq) + u_i + v_i \quad (17)$$

$$\log(Vp) = \beta_0 + \beta_1 \times \log(NA) + u_i + v_i \quad (18)$$

Donde v_i y u_i son componentes de error v y se consideran independientes. El componente v_i se asume que se distribuye de manera simétrica normal $v_i \sim N(0, \sigma_v^2)$ y representa a variaciones aleatorias para la función máxima tamaño-densidad; mientras que, u_i es asimétrico y para el ajuste de la función de densidad máxima se recomienda seleccionar distribuciones con asimetría positiva como la semi-normal (SN), normal-truncada (NT) y exponencial positiva (E) (Zhang *et al.*, 2005; Santiago-García *et al.*, 2013).

Si u_i se distribuye $iid N^+(0, \sigma_u^2)$, entonces v_i se distribuye $iid N(0, \sigma_v^2)$, ambos componentes son mutuamente independientes, y se trata de una distribución SN. La NT es una generalización del modelo SN, permitiendo que la media de u_i sea diferente de 0; el término de error de v_i es $iid N(0, \sigma_v^2)$ y u_i es $iid N^+(\mu, \sigma_u^2)$. En la distribución

E v_i se distribuye *iid* $N(0, \sigma_v^2)$ y u_i se distribuye idéntica e independiente exponencial con el parámetro de escala σ_u (Zhang *et al.*, 2005).

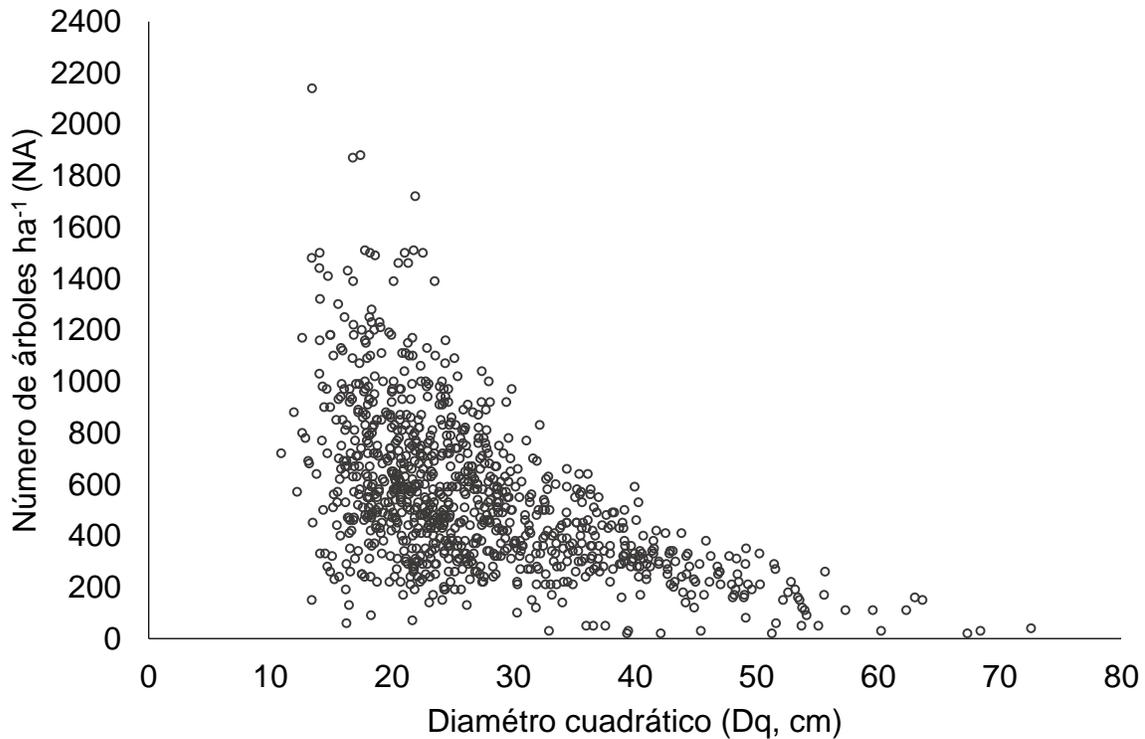


Figura 1. Distribución del diámetro cuadrático promedio vs número de árboles por hectárea de la base de datos utilizada en el estudio.

Los modelos que se ajustan con RFE estiman los valores extremos superior de un conjunto de datos, en lugar del promedio (Santiago-García *et al.*, 2013). En el método estocástico, la propia frontera es una variable aleatoria, de manera que cada observación tiene su propia “función frontera” que se desvía de la función general y se considera que ésta se debe a factores externos no medidos como el tipo de suelo, variaciones climáticas y otros cambios ocurridos en el medio ambiente, específicos de cada rodal en el tiempo (Bi *et al.*, 2000). El modelo divide al término de error en dos componentes como se indica en las Ecuaciones 17 y 18: 1) un error asociado con la medición de las observaciones

individuales en campo (v_i) y 2) un error que se asume para dar cuenta de la ineficiencia técnica de los datos (u_i) (Bi *et al.*, 2000; Belotti *et al.*, 2012; Santiago-García *et al.*,

Para el segundo enfoque (proporciones de grupos de especies) se ajustó solo el modelo de Reineke con MCO, y con las adecuaciones propuestas por Torres-Rojo y Velázquez-Martínez (2000) para un bosque mezclado (Ecuaciones 8 y 9). El procedimiento MCO minimiza la suma de los cuadrados de las distancias entre los observados y los predichos, el valor de la variable dependiente se define como la combinación lineal de las variables independientes más un término de error (John y Dennis, 2003).

2.4.4. SELECCIÓN DE LOS DATOS PARA MÍNIMOS CUADRADOS ORDINARIOS

El método de MCO se considera sensible a la selección de los datos, lo que puede llevar a obtener una línea de densidad máxima con pendiente inapropiada (Zhang *et al.*, 2005). El primer paso fue la estimación tanto del IDR (Ecuación 2) como del IDY (Ecuación 4) por sitio, en las que se utilizó la pendiente propuesta por los investigadores referidos (-1.605 para el IDR, y -1.500 para IDY), se utilizó un D_q igual a 25 cm, valor promedio observado en los sitios de muestreo.

Una vez obtenidos los índices, se eligieron conjuntos de datos de los sitios con mayor ocupación en términos del IDR e IDY, y se ajustaron las Ecuaciones 6 y 7. El principal factor que afecta la selección de los datos para el ajuste de los modelos con MCO, básicamente, es el tipo de datos que se utiliza, en términos de si estos provienen de rodales con o sin intervención. Así, en la literatura se reporta que diversos autores han usado desde 1.7 % hasta 59 % del total de las unidades de muestreo disponibles

(Solomon y Zhang, 2002; Navarro *et al.*, 2011; Corral-Rivas *et al.*, 2015). En este estudio, de los 945 sitios disponibles, se probaron cuatro conjuntos de datos conformados con el 2 %, 5 %, 10 % y 20 % de los sitios de muestreo con mayor ocupación. Con los resultados de estos ajustes, se eligió el que mostró la mayor robustez, a través del coeficiente de determinación (R^2), el error estándar de los estimadores y el valor de t , tanto para el modelo de Reineke como para el de Yoda, para la comparación con los ajustes obtenidos con RFE y, el trazo de las líneas de densidad máxima para generar a partir de estas el DMD.

En el segundo enfoque (proporciones de grupos de especies), se utilizó el conjunto de datos que dio la mejor estimación de los parámetros del modelo de Reineke para el primer enfoque. La estimación del número de árboles con el modelo de Reineke se obtuvo con la Ecuación 8 siempre y cuando se considere que la pendiente es constante, sin embargo, si cada grupo tiene su propia pendiente se utiliza la Ecuación 9.

2.4.5. REGRESIÓN DE FRONTERA ESTOCÁSTICA

Una de las bondades de la regresión de frontera estocástica es evitar la subjetividad en la selección de los datos (Zhang *et al.*, 2005). Sin embargo, en este estudio se ajustaron tanto el modelo de Reineke como el de Yoda con el 100 %, 80 %, 60 %, 50 %, 40 %, 20 %, 10 %, 5 % y 2 % de los datos, y poder analizar el comportamiento de la estimación de la línea de densidad máxima y compararlo con los resultados del ajuste de los mismos modelos con MCO.

2.4.6. AJUSTE DE LOS MODELOS E INDICADORES ESTADÍSTICOS

Los estimadores de los modelos basados en MCO se ajustaron con el procedimiento MODEL y para los modelos de RFE, el ajuste se realizó con el procedimiento QLIM del paquete estadístico SAS/ETS® 9.4 (SAS Institute, 2016). Los indicadores estadísticos que se consideraron para seleccionar el mejor modelo fueron: logaritmo de la verosimilitud máxima (Log L), criterio de información de Akaike (AIC), criterio de Schwarz (SchC), valor de probabilidad de rechazo de los parámetros (valor de p) y el coeficiente de determinación (R^2). Además, la trayectoria de las líneas de densidad máxima fue decisiva para la selección de los modelos.

2.4.7. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD

Los DMDs se construyeron con base en el IDR e IDY. Los estimadores de los conjuntos de datos fueron seleccionados considerando los estadísticos de ajuste óptimos como el Log L, el AIC, el SchC, la R^2 , error estándar de los estimadores y tendencia de la línea de densidad máxima sobrepuestas al conjunto de observaciones (Santiago-García *et al.*, 2013). Posteriormente, se trazaron las líneas de densidad máxima, las cuales se tomaron como referencia para delimitar tres zonas de crecimiento que son clave para el manejo del bosque: zona de mortalidad inminente (A), zona de crecimiento constante (B) y zona de crecimiento libre (C). Las tres regiones mencionadas se delimitan con referencia a la ocupación máxima del sitio (IDR o IDY máximos o 100 % de ocupación), y en este estudio se definieron con base en la información existente en la literatura para diversas especies. Por ejemplo, Long y Shaw (2012) situaron a la zona de crecimiento constante entre el 35 % y el 60 % de ocupación con respecto al 100 % de IDR en un bosque mixto de coníferas en el sureste

de EUA, mientras que Gezan *et al.* (2007) delimitaron para bosques mezclados de *Nothofagus* en el sur de Chile a la zona A en un intervalo de 60 % a 100 %, la zona B de 30 % a 60 % y C de 20 % a 30 %. En México se tiene documentado un DMD para *Pinus patula* y a partir de la mortalidad definieron las zonas de crecimiento como: 55 % a 100 % para la zona A, 30 % a 55 % como zona B y 20 % a 30 % para la zona C (Santiago-García *et al.*, 2013). En este trabajo, se situó a la zona de mortalidad inminente entre el 70 % y el 100 % de densidad relativa, la zona de crecimiento constante entre el 40 % y 70 %, y la zona de crecimiento libre entre 20 % y 40 % de ocupación total.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.5.1. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO ABSOLUTO CON EL IDR

La estimación de la línea de densidad máxima se realizó mediante la relación de tamaño-densidad en las formas lineales, Ecuación 6 para MCO y Ecuación 17 para RFE (Reineke, 1933). Esto permitió controlar la heterogeneidad de varianzas (Gezan *et al.*, 2007).

El Cuadro 1 presenta de manera detallada los estadísticos obtenidos con el modelo de Reineke ajustado con MCO para los diferentes grupos de sitios con mayor ocupación, elegidos para el ajuste. Se considera que las proporciones de los grupos de observaciones seleccionados para el ajuste, son similares a los utilizados por otros investigadores, por ejemplo, Solomon y Zhang (2002) estimaron líneas de densidad máxima para bosques mixtos del noreste de Estados Unidos, agruparon a las especies y utilizaron el 9.77 % del total de sitios para el grupo de *Tsuga* y *Picea*, 5.52 % para Cedro y *Picea* y 1.71 % para *Picea* y *Abies*; Corral-Rivas *et al.* (2015) ajustaron una ecuación que relaciona el número de árboles por hectárea con la altura dominante con

2.16 % de los sitios, para un bosque mixto de pino-encino de Durango, México. Sin embargo, Navarro *et al.* (2011), usaron una mayor cantidad de datos, dado que el muestreo se restringió a sitios sin intervención y con ocupación máxima, por lo que, utilizaron 59 % de las unidades de muestreo disponibles para el ajuste de *Drimys winteri* en el sur de Chile.

Entre menor cantidad de observaciones se considere para el ajuste, tanto el intercepto (α_0) que hace referencia al número máximo de individuos que puede haber en una superficie con respecto a un diámetro cuadrático, como la pendiente (α_1) aumentan (Cuadro 1), lo que implica que se va aproximando al límite superior de la relación NA-Dq. Sin embargo, hay un costo estadístico, ya que al reducir el número de observaciones disminuye el valor relativo de los parámetros respecto a su error estándar (valor de t) y, los parámetros estimados tienen intervalos de confianza más amplios. Al comparar los intervalos de confianza tanto de la pendiente como del intercepto, se observa que usar el 2 % de las observaciones produce intervalos de confianza al 95 % que contienen a los parámetros del ajuste con el 20 %, por lo que sacrificar estos datos es inconveniente. La R^2 en todas las regresiones osciló de 0.91 a 0.97, lo que indica que el modelo explica más del 90 % de la variabilidad. Por lo anterior, se eligieron los estadísticos obtenidos a partir del 20 % de las observaciones. (190 sitios) para hacer la comparación con RFE.

Cuadro 1. Estadísticos del ajuste del modelo de Reineke con cuatro conjuntos de datos provenientes de los sitios con mayor ocupación (sitios densos).

Número	Porcentaje (%)	Parámetro	Estimador	EE	Valor de t	Pr > t	R ²
19	2	α_0	5.403	0.105	51.68	<0.0001	0.97
		α_1	-1.663	0.072	-23.06	<0.0001	
48	5	α_0	5.374	0.072	74.80	<0.0001	0.96
		α_1	-1.670	0.049	-34.27	<0.0001	
95	10	α_0	5.283	0.061	86.27	<0.0001	0.94
		α_1	-1.632	0.041	-39.39	<0.0001	
190	20	α_0	5.197	0.054	95.48	<0.0001	0.91
		α_1	-1.605	0.037	-43.46	<0.0001	

α_i : parámetros del modelo; EE: error estándar del estimador; t: valor que está asociado a la distribución t de student del estimador del parámetro; Pr>|t|: valor de la probabilidad de t y R²: coeficiente de determinación.

La RFE se puede realizar con todas las observaciones y esto se recomienda para evitar eliminar datos que estén poco cercanos a la frontera superior. Sin embargo, no siempre esto es conveniente, debido a que utilizar sitios con densidades muy bajas afecta la estimación de la frontera. Los ajustes con todas las observaciones sugieren que se puede detectar una frontera de manera eficiente, pero al construir los DMDs con estos estimadores se obtenían valores de número de árboles y Dq que traducidos en términos de áreas basales y volúmenes por ha sugerían valores muy por encima de los máximos encontrados en la región. Para que las comparaciones fueran estadísticamente equivalentes, se usó el 20 % de los datos de los sitios con máxima ocupación determinado con MCO para el ajuste de RFE (Cuadro 2).

Cuadro 2. Estadísticos del ajuste para el modelo de Reineke con RFE.

Modelo	Parámetros	Estimadores	EE	t	Pr> t	Log L	AIC	SchC	λ
RFE-E	α_0	5.197	0.135	38.47	<0.0001	270.12	-532.23	-519.24	0.0005
	α_1	-1.605	0.037	-43.67	<0.0001				
	σ_v	0.058	0.003	19.49	<0.0001				
	σ_u	3.137E-05	0.123	0	0.9998				
RFE-SN	α_0	5.197	0.117	44.55	<0.0001	270.12	-532.23	-519.24	0.0059
	α_1	-1.605	0.037	-43.69	<0.0001				
	σ_v	0.058	0.003	19.42	<0.0001				
	σ_u	0.0003	0.130	0	0.9978				
RFE-NT	α_0	5.445	0.482	11.30	<0.0001	-57.09	124.18	140.41	1.5729
	α_1	-1.243	0.325	-3.82	0.0001				
	σ_v	0.288	0.022	12.94	<0.0001				
	σ_u	0.453							
	μ	0.495							

RFE (E, SN y NT): modelación con regresión de frontera estocástica con distribuciones de tipo exponencial, semi-normal y normal-truncada; Log L: logaritmo de verosimilitud; AIC: Criterio de información de Akaike; SchC: Criterio de Schwarz y λ : lambda.

Al comparar los estadísticos del modelo de Reineke obtenidos con MCO (20 % de las observaciones) y RFE, se aprecia que los estimadores adquieren valores similares, a excepción de RFE en la forma NT que tiene una pendiente menos pronunciada pero un intercepto mayor.

En la Figura 2 se muestran las líneas de densidad máxima tanto para MCO como para RFE, sobrepuestas al 20 % de las observaciones (190 sitios de muestreo). Los estimadores obtenidos con RFE en las formas E y SN así como MCO estiman la misma línea de densidad máxima, en tanto que RFE en la forma NT sobreestima la frontera máxima respecto a las observaciones (Figura 2), por lo que se consideró que el modelo no resultaba ser el más apropiado para representar el límite de densidad

máxima. Lo anterior fue congruente con los valores de los estimadores de los ajustes con MCO y RFE presentados en los Cuadros 1 y 2.

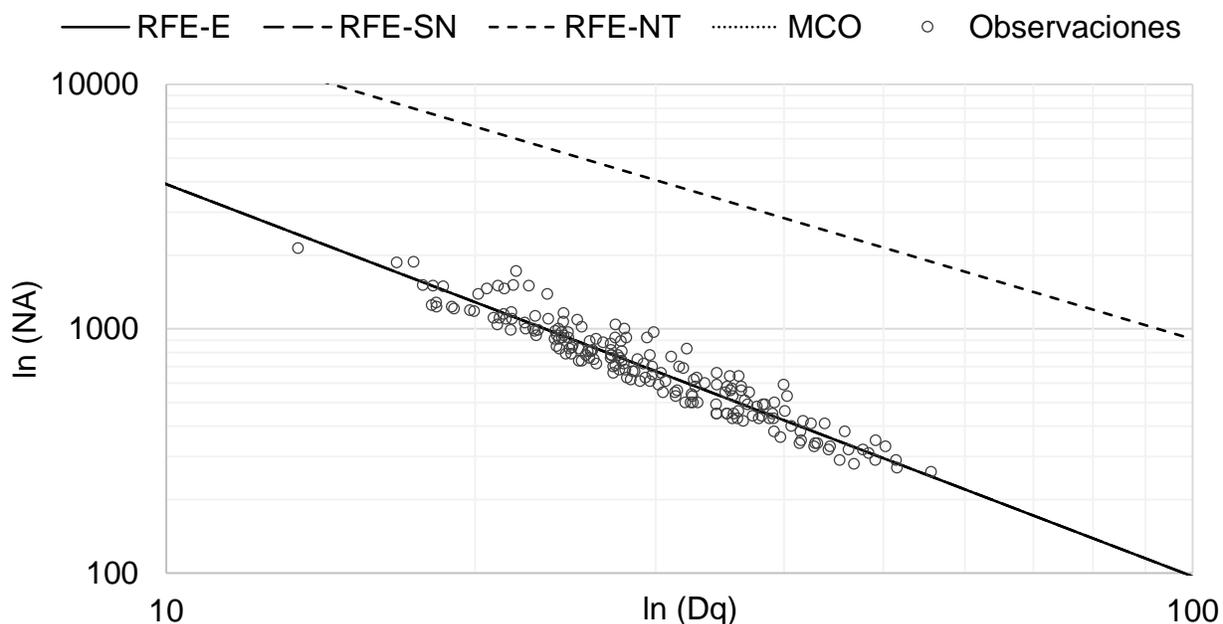


Figura 2. Líneas de densidad máxima sobrepuestas a las observaciones, obtenidas con el modelo de Reineke mediante RFE y MCO.

Zhang *et al.* (2005), indican que el ajuste obtenido con MCO representa una línea promedio al conjunto de datos, mientras que RFE estima el valor extremo superior del conjunto de datos en lugar del promedio, en este estudio se encontró que al seleccionar el 20 % de las observaciones y ajustar los modelos tanto de Reineke como de Yoda, los ajustes con RFE en las formas E y SN estiman la línea promedio vía MCO del conjunto de observaciones usadas.

2.5.2. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO ABSOLUTO CON EL IDY

La regresión obtenida con el modelo de Yoda para cuatro conjuntos de sitios más densos, tuvo una tendencia similar a la encontrada con el modelo de Reineke, cuando se reduce el número de observaciones cerca de la densidad máxima (Cuadro 3).

Cuadro 3. Estadísticos del ajuste del modelo de Yoda con cuatro conjuntos de sitios más densos mediante MCO.

Número	Porcentaje (%)	Parámetros	Estimadores	EE	t	Pr > t	R ²
19	2	β_0	4.074	0.192	21.23	<0.0001	0.96
		β_1	-1.391	0.068	-20.49	<0.0001	
48	5	β_0	4.225	0.160	26.34	<0.0001	0.94
		β_1	-1.470	0.057	-25.90	<0.0001	
95	10	β_0	3.967	0.130	30.44	<0.0001	0.91
		β_1	-1.402	0.047	-29.95	<0.0001	
190	20	β_0	3.781	0.099	38.06	<0.0001	0.88
		β_1	-1.367	0.036	-37.7	<0.0001	

El Cuadro 4 muestra los estadísticos del ajuste del modelo de Yoda con RFE en los tres tipos de distribuciones. Al igual que con la ecuación de Reineke, se utilizaron datos del 20 % del total de las observaciones para el ajuste de la regresión. Con los estimadores de los parámetros se trazaron las líneas de densidad máxima con MCO y RFE (Figura 3). Esto fue clave para elegir el modelo que mejor estimó la línea de densidad máxima para este bosque.

La Figura 3 muestra la tendencia de las líneas de densidad máxima. RFE en las formas E y SN estiman la misma línea de densidad máxima que se logra con MCO. Los criterios AIC y SchC de RFE en la forma E y SN indican que son los más adecuados para estimar la línea de densidad máxima respecto a RFE en la forma NT (Cuadro 4).

Cuadro 4. Estadísticos del modelo de Yoda con RFE.

Modelo	Parámetros	Estimadores	EE	t	Pr> t	Log L	AIC	SchC	λ
RFE-E	β_0	3.776	0.117	32.35	<0.0001	147.64	-287.28	-274.27	0.0120
	β_1	-1.365	0.036	-37.83	<0.0001				
	σ_v	0.112	0.006	19.38	<0.0001				
	σ_u	0.001	0.062	0.02	0.9827				
RFE-SN	β_0	3.781	0.688	5.50	<0.0001	147.64	-287.29	-274.28	0.0006
	β_1	-1.368	0.036	-37.90	<0.0001				
	σ_v	0.112	0.006	19.54	<0.0001				
	σ_u	6.242E-05	0.853	0	0.9999				
RFE-NT	β_0	3.868	0.427	9.05	<0.0001	-42.33	94.67	110.93	2.1636
	β_1	-1.131	0.154	-7.33	<0.0001				
	σ_v	0.207	0.029	7.16	<0.0001				
	σ_u	0.449							
	μ	0.487							

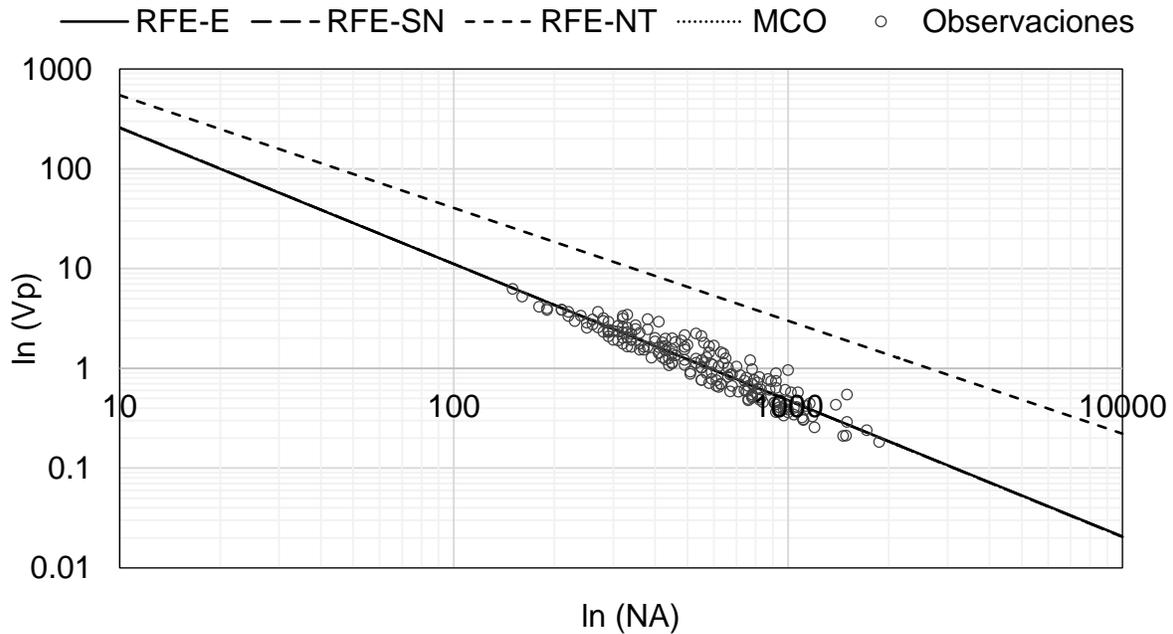


Figura 3. Líneas de densidad máxima sobrepuestas a las observaciones, obtenidas con el modelo de Yoda mediante MCO y RFE.

2.5.3. ESTIMACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA PARA EL BOSQUE MEZCLADO CON PROPORCIONES DE ESPECIES

El número de árboles de un bosque mezclado con el modelo de Reineke que considera las proporciones de grupos de especies se obtuvo con la Ecuación 8, al suponer una pendiente constante y Ecuación 9 cuando se considera que la pendiente es variable para cada grupo de especies. Los ajustes de estas ecuaciones se presentan en los Cuadros 5 y 6.

Cuadro 5. Estimadores del modelo de Reineke con pendiente constante.

Parámetros	Estimación	EE	Valor t	Pr > t	R ²
α_1	5.290	0.061	86.62	<0.0001	0.90
α_2	5.236	0.063	83.72	<0.0001	
α_3	5.202	0.065	79.63	<0.0001	
α_4	5.280	0.080	65.67	<0.0001	
β	-1.669	0.041	-40.37	<0.0001	

Cuadro 6. Estimadores del modelo de Reineke con pendiente variable.

Parámetros	Estimación	EE	Valor t	Pr > t	R ²
α_1	5.221	0.123	42.34	<0.0001	0.90
α_2	5.455	0.307	17.78	<0.0001	
α_3	5.161	0.408	12.66	<0.0001	
α_4	5.270	0.807	6.53	<0.0001	
β_1	-1.622	0.085	-19.13	<0.0001	
β_2	-1.820	0.211	-8.62	<0.0001	
β_3	-1.642	0.278	-5.9	<0.0001	
β_4	-1.664	0.521	-3.19	0.0017	

Es importante considerar las proporciones de especies o grupos de especies en bosques mezclados, dado que cada grupo de especie es diferente en el grado de tolerancia a la sombra (Sales y Fonseca, 2004). Al considerar las proporciones de

especies en el ajuste del modelo de Reineke como lo propusieron Torres-Rojo y Velázquez-Martínez (2000) se observó que los rodales con presencia de *Pinus* y otras coníferas son las que pueden soportar un mayor número de árboles respecto a los grupos *Quercus* y latifoliadas al encontrarse un mayor valor en el intercepto (Cuadro 5) y considerando una pendiente constante. Resultados similares a este estudio fue encontrado por Gezan *et al.*, (2007) quienes reportaron diferencias en el intercepto para *Nothofagus alpina*, *N. obliqua* y *N. dombeyi* (11.6167, 11.3770 y 11.7630, respectivamente).

Al suponer una pendiente variable para cada grupo de especie (Cuadro 6), en términos de tolerancia a la sombra, se observa que el grupo de *Pinus* son las más intolerantes a la sombra por tener una pendiente menor, seguido del grupo de latifoliadas; ocurre lo contrario con el grupo de *Quercus* que resultaron ser las más tolerantes a la sombra. Por otra parte, se ha demostrado que cada especie tiene una pendiente específica, influenciada por las condiciones del medio ambiente y otros factores asociados a las condiciones específicas del lugar, esto indica que las líneas de densidad máxima se deben estimar por región y para la mezcla específica del bosque (Pretzsch y Biber, 2005; Comeau *et al.*, 2010).

2.5.4. DIAGRAMAS DE MANEJO DE LA DENSIDAD

Los DMDs se construyeron con el IDR y el IDY, ambos basados en las líneas de densidad máxima obtenidas con RFE en la forma SN. La línea de densidad máxima se consideró como la del 100 % y a partir de esta se definieron las tres zonas de crecimiento como se indican en las Figuras 4 y 5.

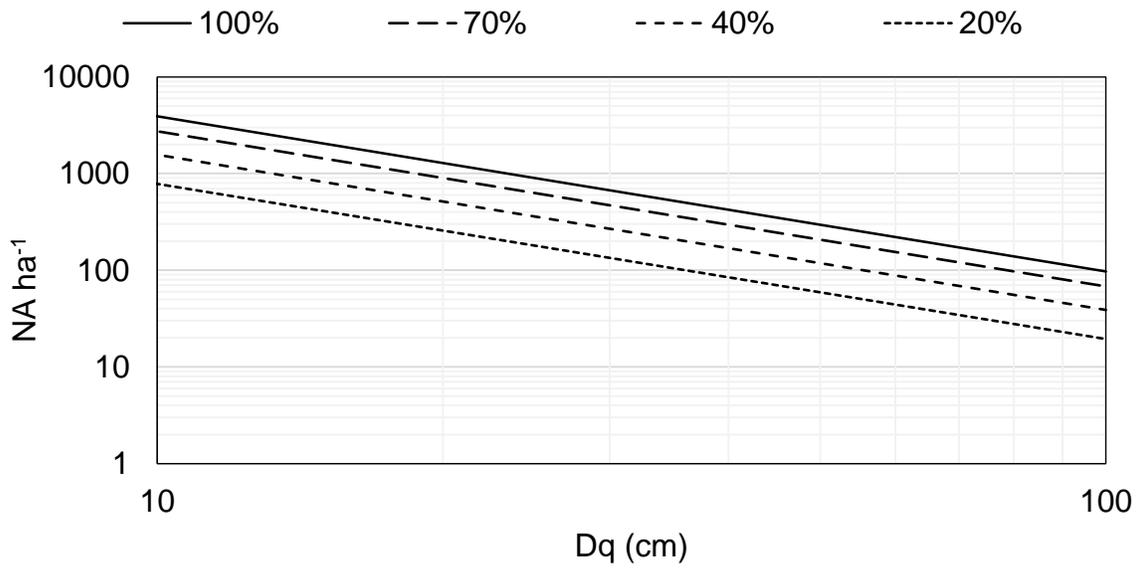


Figura 4. Diagrama de manejo de la densidad basado en el IDR para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.

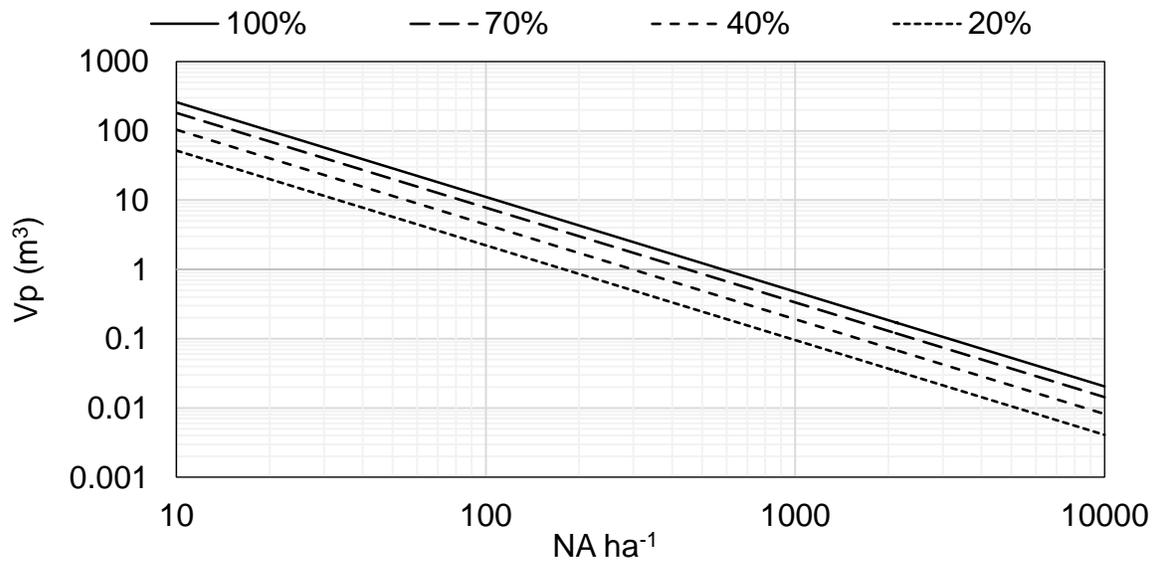


Figura 5. Diagrama de manejo de la densidad para el bosque mezclado de San Pedro el Alto con el IDY.

2.6. CONCLUSIONES

Después de ajustar los modelos de Reineke y Yoda con los métodos de RFE y MCO, se concluye que no siempre es conveniente utilizar todas las observaciones con RFE. El peso de los rodales con menor densidad aunque no afecta muchas veces la detección de la frontera, tiende a disminuir considerablemente el valor de la pendiente, lo que produce sobreestimaciones del AB máxima que estos rodales pueden soportar. Por lo tanto, la forma tradicional de construir los DMDs con base en una selección de datos cercanos a la densidad máxima, aunque se considera subjetiva no siempre es estadísticamente inadecuada. En este estudio se encontró que para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca con las proporciones de especies presentes es suficiente utilizar el 20 % de los sitios con máxima ocupación, respecto del total de las unidades de muestreo.

Una vez que se ha censurado los datos, se observó que la estimación de la línea de densidad máxima no difiere al utilizar MCO y RFE en las formas E y SN, esto implica que el ajuste con el 20 % de los datos ya se está cerca de la frontera superior. Mientras que, RFE en la forma NT no se recomienda su uso para estimar la línea de densidad máxima al menos para el tipo de bosques bajo estudio, por la sobreestimación de la frontera.

En un bosque mezclado es importante considerar las proporciones de los grupos de especies presentes, debido a que algunas son tolerantes a la sombra y otras son intolerantes, esto resulta relevante al planear las intervenciones silvícolas ya que por sus características no responden de igual forma a los tratamientos, si a eso le sumamos que el objetivo de manejo es mantener el bosque mezclado, entonces, se vuelve más relevante.

2.7. LITERATURA CITADA

- Aigner, D., C. A. K. Lovell and P. Schmidt. 1977. Formulation and estimation of stochastic frontier production function models. *Journal of Econometrics* 6: 21-37.
- Anhold, J., M. J. Jenkins and J. N. Long. 1996. Management of lodgepole pine stand density to reduce susceptibility to mountain pine beetle attack. *Western Journal of Applied Forestry* 11: 50-53.
- Barton B., D. y L. Merino P. 2004. La experiencia de las comunidades forestales en México veinticinco años de silvicultura y construcción de empresas forestales comunitarias. Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México, México. 276 p.
- Belotti, F., S. Daidone and G. Ilardi. 2012. Stochastic frontier analysis stata. *The Stata Journal* 10: 1-30.
- Bi, H., G. Wan and N. D. Turvey. 2000. Estimating the self-thinning boundary line as a density-dependent stochastic biomass frontier. *Ecology* 81: 1477-1483.
- Caballero D., M. 2010. La verdadera cosecha maderable en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1: 5-16.
- Castedo-Dorado, F., F. Creciente-Campo, P. Álvarez-Álvarez and M. Barrio-Anta. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82: 1-16.
- Chauchard, L. M. y M. O. Fernández. 2004. Diagramas de manejo de la densidad de masas de pino radiata en el país Vasco. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 18: 161-166.

- Chauchard, L., R. Sbrancia, M. Gonzalez, L. Maresca y A. Rabino. 1999. Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$ o ley del autorraleo. *Bosque* 20: 79-94.
- Comeau, P. G., M. White, G. Kerr and S. E. Hale. 2010. Maximum density-size relationships for sitka spruce and coastal douglas-fir in Britain and Canada. *Forestry* 83:461-468.
- Corral-Rivas, S., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas, C. Wehenkel y C. A. López-Sánchez. 2015. Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México. *Bosque* 36: 409-421.
- De los Santos-Posada, H. M., J. R. Valdez-Lazalde and J. M. Torres-Rojo. 2015. San Pedro el Alto community forest, Oaxaca, Mexico. *In: Forest plans of North America*. Siry, J. P., P. Bettinger, K. Merry, D. L. Grebner, K. Boston and C. Creszewski. (eds.). Academic Press. London, Reino Unido. pp: 199-208.
- Del Amo R., S. 1985. Algunos aspectos de la influencia de la luz sobre el crecimiento de estados juveniles de especies primarias *In: Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México*. Gómez-Pompa, A. y S. Del Amo R. (eds.). Alhambra Mexicana, S.A de C.V. México, D.F. pp: 79-91.
- Gezan, S. A., A. Ortega y E. Andenmatten. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque* 28: 97-105.
- Hernández R., J., J. J. García M., H. J. Muñoz F., X. García C., T. Sáenz R., C. Flores L. y A. Hernández R. 2013. Guía de densidad para el manejo de bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4: 62-77.

- John, P. and L. Dennis W. 2003. A comparison of ordinary least square and logistic regression. *The Ohio Journal of Science* 103: 118-125.
- Long, J. N. and J. D. Shaw. 2005. A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands. *Western Journal of Applied Forestry* 20: 205-215.
- Long, J. N. and J. D. Shaw. 2012. A density management diagram for even-aged Sierra Nevada mixed-conifer stands. *Western Journal of applied Forestry* 27: 187-195.
- López-Sánchez, C. and R. Rodríguez-Soalleiro. 2009. A density management diagram including stand stability and Crown fire risk for *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) franco in Spain. *Mountain Research and Development* 29: 169-176.
- Müller-Using, B., R. Rodríguez y P. Gajardo. 2013. Desarrollo de una guía de manejo de la densidad en bosques de segundo crecimiento de roble (*Nothofagus oblicua*) en la región del Biobío. *Bosque* 34: 201-209.
- Navarro C., C., M. A. Herrera, F. Drake A. y P. J. Donoso. 2011. Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. *Bosque* 32: 175-186.
- Newton, P.F. 1997. Stand density management diagrams: review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management* 98: 251-265.
- Pretzsch, H. and P. Biber. 2005. A re-evaluation of Reineke's rule and stand density index. *Forest Science* 51: 304-320.
- Puettmann, K. J., D. E. Hibbs and D. W. Hann. 1992. The dynamics of mixed stands of *Alnus rubra* and *Pseudotsuga menziesii*: extension of size-density analysis to species mixture. *Journal of Ecology* 80: 449-458.

- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research* 46: 627-638.
- Reyes-Hernández, V., P. G. Comeau and M. Bokalo. 2013. Static and dynamic maximum size-density relationships for mixed trembling aspen and white spruce stands in western Canada. *Forest Ecology and Management* 289: 300-311.
- Rosas-Baños, M. y R. Lara-Rodríguez. 2013. Desarrollo endógeno local sustentable y propiedad común: San Pedro el Alto, México. *Cuadernos de Desarrollo Rural* 10: 59-80.
- Sales L., J. F. and T. F. Fonseca. 2004. The allometric model in the stand density management of *Pinus pinaster* Ait. in Portugal. *Annals of Forest Science* 61: 807-814.
- 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 el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia* 47: 75-89.
- SAS Institute 2016. SAS/ETS® 9.4 Configuration Guide for SAS®9.4. Foundation for UNIX Environments, SAS Institute.
- Schnell, S., C. Kleinn and J. G. Álvarez G. 2012. Stand density management diagrams for three exotic tree species in smallholder plantations in Vietnam. *Small-scale Forestry* 11: 509-528.
- Shaw, J. D. and J. N. Long. 2007. A density management diagram for longleaf pine stands with application to red-cockaded woodpecker habitat. *Southern Journal of Applied Forestry* 31: 28-38.

- Shinozaki, K. and T. Kira. 1956. Intraspecific competition among higher plants. VII. Logistic theory of the C-D effect. *Journal of the Institute of Polytechnics* 12: 69-82.
- Solomon, D. S. and L. Zhang. 2002. Maximum size-density relationships for mixed softwoods in the northeastern USA. *Forest Ecology and Management* 155: 163-170.
- Soto, D. P., C. Salas, P. J. Donoso y D. Uteau. 2010. Heterogeneidad estructural y espacial de un bosque mixto dominado por *Nothofagus dombeyi* después de un disturbio parcial. *Revista Chilena de Historia Natural* 83: 335-347.
- Sun, H., J. Zhang, A. Duan and C. He. 2011. Estimation of the self-thinning boundary line within even-aged chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook) stands: onset of self-thinning. *Forest Ecology and Management* 261: 1010-1015.
- Torres-Rojo, J. M. y A. Velázquez-Martínez. 2000. Índice de densidad relativa para rodales coetáneos mezclados. *Agrociencia* 34: 497-507.
- Vacchiano, G., R. Justin D., J. D. Shaw, M. Svoboda and R. Motta. 2013. A density management diagram for Norway spruce in the temperate European montane region. *European Journal of Forest Research* 132: 535-549.
- Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa and K. Hozumi. 1963. Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI). *Journal of Biology* 14: 107-129.
- Zeide, B. 2005. How to measure stand density. *Trees* 19: 1-14.
- Zhang, L., H. Bi, J. H. Gove and L. S. Heath. 2005. A comparison of alternative methods for estimating the self-tinning boundary line. *Canadian Journal of Forestry Research* 35: 1507-1514.

CAPÍTULO III

MANEJO DE LA DENSIDAD USANDO ESPACIAMIENTO RELATIVO EN UN BOSQUE MEZCLADO DE SAN PEDRO EL ALTO

3.1. RESUMEN

Los diagramas de manejo de la densidad (DMDs) son herramientas que describen la estructura del rodal, al representar las relaciones entre el número de árboles por hectárea, altura dominante, espaciamiento relativo (ER), diámetro cuadrático (Dq) y volumen (VHA). Una medida sencilla para evaluar la densidad es el ER. En este trabajo el ER se estimó considerando una distribución de tres bolillo (triangular), dado que se trata de un bosque mezclado natural. El DMD se construyó con datos de 945 sitios temporales y se utilizaron 191 sitios con los menores valores de ER para determinar la línea de densidad máxima (LDM). El DMD construido es de tipo multidimensional y una de las limitaciones de la aplicación del ER es que, árboles de diferente tolerancia a la sombra requerirán un menor ER para mantenerse en la zona de crecimiento constante. Esto dificulta la definición de la mezcla más adecuada además, de las evidentes diferencias en patrones de crecimiento que permiten que coníferas sean las que mayormente caractericen al ER.

Palabras clave: bosque mezclado, diámetro cuadrático, DMD, espaciamiento relativo, secuela de aclareos, volumen.

DENSITY MANAGEMENT FOR MIXED FOREST USING RELATIVE SPACING AT SAN PEDRO EL ALTO

3.2. ABSTRACT

Relative spacing (RS) is one of the simplest ways to determine stand and stocking density and is widely used to determine competition at pure even aged stands. In this study a multidimensional density management diagrams (MDMD) based on RS is built for managed mixed stands. The MDMD includes measures of stocking such as volume, quadratic mean diameter and number of trees. Data from 945 plots of 1000 m² measured in a managed mixed forest sampled in 2013 and 2014 were used. Only the 20% of the densest plots was used to define the maximum density relationship. Results suggest that despite the success of the approach on estimating density measures the shade-tolerant species require smaller RS for equally dense stands. However, for pine dominated stands the RS will strongly characterize the stand density condition.

Key words: mixed forest, quadratic mean diameter, density management diagrams, relative spacing, thinning sequence, volume.

3.3. INTRODUCCIÓN

El espaciamiento relativo (ER) también conocido como índice de Hart o Hart-Becking, se expresa en porcentaje y se define como el promedio de la distancia que existe entre los árboles y el promedio de la altura dominante (García, 1981; Bredenkamp y Burkhart, 1990; Zhao *et al.*, 2010). Esta relación fue propuesta por Hart en 1928 y fue aplicada por Becking en 1953 para evaluar ensayos de aclareos con el nombre de índice de espaciamiento. En el trabajo se concluyó que cada especie tiene un valor de ER en el que se logra el máximo rendimiento (*e. g.* para *Pseudotsuga menziesii* es 22 % de ER). Sin embargo, el término de espaciamiento relativo fue utilizado por Beekhuis en 1966 para predecir la mortalidad natural debida a la competencia intraespecífica. En bosques de coníferas de etapas tempranas, se observó rápido crecimiento en altura y el ER tiende a disminuir con el desarrollo del rodal, lo que indica que se han alcanzado densidades máximas.

El ER es uno de los métodos disponibles para construir DMDs, pero ha sido poco usado. El primer DMD desarrollado con el ER fue para predecir la mortalidad de *Pinus radiata* en las zonas norte, centro y sur de Nueva Zelanda (Beekhuis, 1966). Sin embargo, en los últimos años en España, se han construido DMDs en función del índice de Hart-Becking para plantaciones y para bosques con regeneración natural uniespecíficos (Barrio y Álvarez, 2005; Barrio-Anta *et al.*, 2006; Castaño-Santamaría *et al.*, 2013). En el noreste y sur de Vietnam, se construyeron DMDs para plantaciones de *Acacia hybrid*, *A. mangium* y *Eucalyptus urophylla* (Schnell *et al.*, 2012). En México, se han trabajado DMDs basados en ER para rodales naturales en el ejido El Largo,

Chihuahua y para bosques mixtos e irregulares en Durango (Escobedo, 2014; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Los DMDs basados en el ER difieren de los diagramas construidos con los enfoques de Reineke (1933) y Yoda (1963), básicamente en que el primero incluye isolíneas de diámetro cuadrático y volumen, además de las variables altura dominante y densidad representadas en los ejes principales del DMD.

La función principal de un DMD es de proveer información suficiente y eficiente para definir niveles de densidad apropiados durante el turno del rodal, pero basados en los objetivos del manejo forestal u objetivos del silvicultor (Corral-Rivas *et al.*, 2015). Desde el punto de vista maderable, con la aplicación de aclareos se pueden aprovechar los recursos disponibles de un rodal, como la humedad, luz y el espacio de crecimiento. Esto se logra con un intervalo adecuado de niveles de densidad en función de los objetivos de manejo y las especies presentes en un rodal, por lo que es necesario establecer los límites superior e inferior de densidad (zona de crecimiento constante), en los que se debe mantener el bosque para asegurar el máximo aprovechamiento del espacio de crecimiento de los árboles (Barrio y Álvarez, 2005; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Se recomienda determinar los límites de la zona de crecimiento constante con el establecimiento de sitios permanentes para observar y registrar los cambios en densidad y crecimiento de los individuos a través del tiempo. Sin embargo, este método presenta ciertas limitantes, por ejemplo: a) se requieren varios años para completar un ciclo y establecer las edades para las intervenciones silvícolas, b) se elevan los costos y esfuerzos de muestreo y, c) los resultados no pueden aplicarse

con certidumbre en calidades de estación, especies y objetivos de gestión diferentes (Barrio y Álvarez, 2005; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

La comunidad indígena de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca posee 26,000 ha de uso forestal, en donde los géneros de árboles más representativos del bosque son *Pinus*, *Abies*, *Cupressus*, *Quercus* y *Arbutus*. Estos bosques se encuentran con manejo forestal con propósitos de producción maderable; sin embargo, la comunidad no dispone de herramientas que faciliten el manejo de los niveles de densidad del bosque. Por lo anterior, en el presente trabajo se planteó como principal objetivo, el de desarrollar diagramas de manejo de la densidad utilizando el espaciamiento relativo (ER), que considere los grupos de especies dominantes del bosque en referencia, con el supuesto de que el bosque de la comunidad puede ser manejado a través de diagramas de manejo de densidad contruidos con información de los grupos de especies representativos, aun cuando el principal objetivo es la producción de madera de especies del género *Pinus*.

3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

3.4.1 COLECTA DE DATOS

Para desarrollar el estudio se colectó información dasométrica en 945 sitios temporales establecidos en el bosque de San Pedro el Alto, Zimatlán, Oaxaca. Los sitios fueron de 1,000 m² de superficie y de forma circular. En los sitios de muestreo se registraron varias especies, entre las que destacan 11 especies del género *Pinus* (*Pinus ayacahuite* C. Ehrenb. Ex Schltld., *P. douglasiana* Martínez, *P. lawsonii* Roetzl ex Gordon, *P. leiophylla* Schiede ex Schltld. & Cham., *P. devoniana* Lindl., *P. montezumae* Gordon & Glend., *P. oocarpa* Schiede ex Schltld., *P. patula* Schltld. & Cham., *P. pringlei* Shaw, *P. pseudostrobus* Gordon & Glend., *P. teocote* Schltld. & Cham) y especies del género

Quercus. También, se registraron *Arbutus spp*, *Alnus spp*, *Abies oaxacana* Mart. y otras especies de latifoliadas que, para los fines de este estudio, se clasificaron como “grupo latifoliadas”.

Las variables dasométricas registradas en campo fueron el número de árboles por sitio (N), diámetro normal (DN, cm) y altura de árboles dominantes (AT, m), además de las especies o en su caso género. Con estas variables, se estimó el volumen por hectárea (VHA, m³ ha⁻¹), diámetro cuadrático (Dq, cm), área basal por hectárea (AB, m² ha⁻¹) y densidad por hectárea (NA, número de árboles por hectárea).

3.4.2. AGRUPACIÓN DE ESPECIES Y ESTIMACIÓN DE VARIABLES

Las especies se agruparon de acuerdo a su género en: 1) *Pinus*, 2) *Quercus*, 3) otras latifoliadas y 4) otras coníferas. Esta agrupación fue útil para el ajuste de ecuaciones que permitieron la estimación de las alturas totales de los individuos que no se midieron en campo. Para ajustar las ecuaciones de altura total se utilizó al diámetro normal como variable predictora (Huang y Titus, 1992; Arías, 2004; Trincado y Leal, 2006). Otros estudios han utilizado, además del diámetro normal, a la altura dominante (Barrio *et al.*, 2004), área basal, número de árboles e índice de sitio como variables predictoras (Sharma y Parton, 2007).

De las ecuaciones ajustadas por grupo de especies, se eligieron las que presentaron mayor valor de coeficiente de determinación (R²), menor valor de error estándar de los estimadores de los parámetros y menor raíz del cuadrado medio del error. Posteriormente el volumen total por árbol se estimó con modelos locales de volumen total con corteza tipo Schumacher y Hall. La altura dominante (H) se estimó como el promedio de la altura de los 100 individuos más altos por hectárea (Vásquez,

1986), mientras que el diámetro cuadrático (Dq , en cm) así como el área basal ($m^2 ha^{-1}$) se estimaron por hectárea. Esta información (Cuadro 7) se utilizó para la construcción del DMD del bosque mezclado.

Cuadro 7. Estadísticos de las variables usadas en la construcción del DMD del bosque mezclado de San Pedro el Alto.

Variable	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
NA (ha^{-1})	553.23	301.35	20.00	2140.00
Dq (cm)	26.85	9.64	10.88	72.58
H (m)	23.17	8.90	3.63	46.80
VHA ($m^3 ha^{-1}$)	276.60	234.67	5.48	1199.10
AB ($m^2 ha^{-1}$)	27.49	13.87	1.25	74.05

N=945 sitios.

3.4.3. ÍNDICE DE ESPACIAMIENTO RELATIVO

El ER se puede estimar considerando ya sea una distribución espacial cuadrangular de los individuos o una a “tres bolillo” (*i. e.* los individuos se sitúan en los vértices de mallas formadas por triángulos equiláteros); el espaciamiento de tres bolillo es el que más se asemeja a la distribución de los individuos en un bosque natural mezclado (Barrio y Álvarez, 2005), razón por la cual este fue utilizado en este estudio para estimar el ER (Ecuación 1):

$$ER \% = \frac{\sqrt{\frac{20000}{NA \times \sqrt{3}}}}{H} \times 100 \quad (1)$$

Donde ER es el espaciamiento relativo expresado en porcentaje, NA es el número de árboles por hectárea y H es la altura dominante en metros.

Las constantes 20,000 y $\sqrt{3}$, se debe al tipo de arreglo. Dado que el ER está en función de la distancia entre individuos en metros (a) y la altura dominante en metros (H) ($ER =$

$\left(\frac{a}{H}\right) \times 100$), a varía de acuerdo al tipo de arreglo. Por ejemplo, para un arreglo a marco real $NA \times a^2 = 10,000$, entonces $ER = \frac{100^2}{H \times \sqrt{NA}}$. Al considerar un arreglo de tres bolillo (triángulo equilátero), el ER se transforma en $ER = \frac{a \times 100}{H} = \frac{100^2}{H} \times \sqrt{\frac{2}{NA \times \sqrt{3}}} = \frac{\sqrt{\frac{20000}{NA \times \sqrt{3}}}}{H} \times 100$ (Bravo *et al.*, 1997).

El numerador de la Ecuación 1, representa la distancia promedio que existe entre cada individuo en un tiempo y espacio específico, bajo el supuesto de un espaciamiento triangular. El ER se considera un índice independiente de la calidad de sitio (Barrio y Álvarez, 2005) y de la edad del rodal, con la excepción de rodales jóvenes (Long, 1985; Corral-Rivas *et al.*, 2015). La altura es una de las variables que desde el punto de vista biológico, es adecuada para programar las intervenciones silvícolas en rodales a través del tiempo (Barrio y Álvarez, 2005; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

3.4.4. LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA CON BASE EN EL ER

Para definir la línea de densidad máxima en el DMD, se ajustó una ecuación para relacionar en forma lineal el número de árboles por hectárea con la altura dominante. El ajuste de la Ecuación 2 se realizó con los sitios que tuvieron menor valor de ER (191 sitios, Figura 6), con lo cual se buscó garantizar que se tratara de sitios con las densidades más altas.

$$\log(NA) = \beta_0 + \beta_1 \times \log(H) + \varepsilon \quad (2)$$

Donde \log es el logaritmo base 10, NA es el número de árboles por hectárea, H representa a la altura dominante, β_i son los parámetros del modelo y ε es el término de error del modelo.

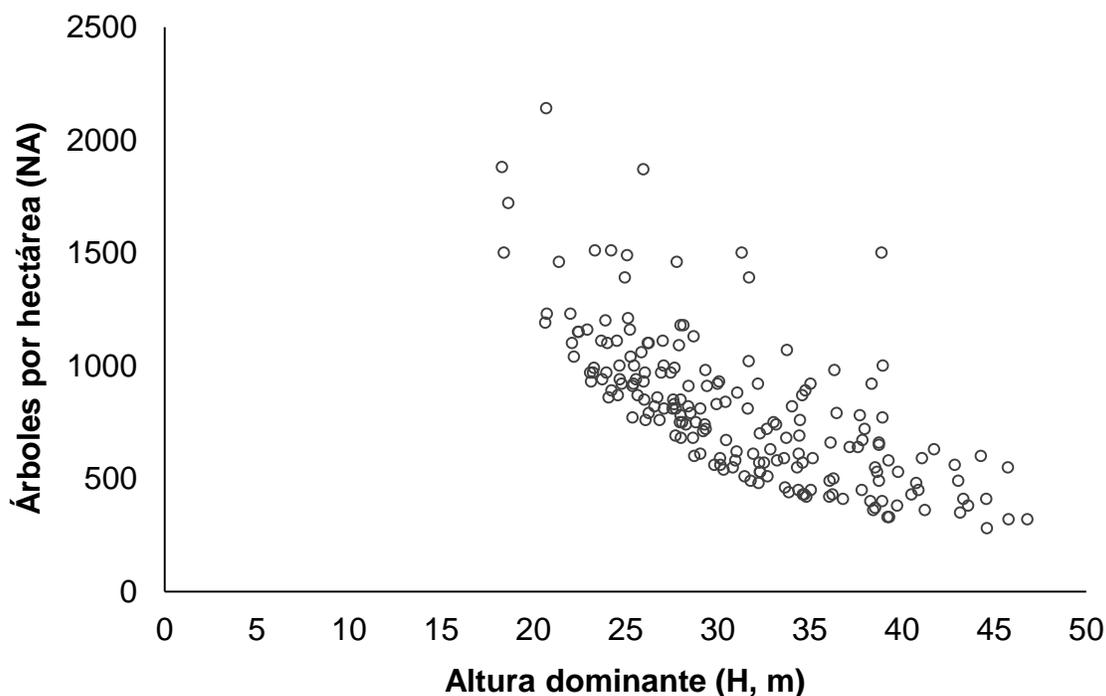


Figura 6. Distribución de la altura dominante promedio vs densidad del rodal de la base de datos utilizada para la estimación de la línea de densidad máxima.

3.4.5. DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD

Tradicionalmente, un DMD basado en el ER solo tiene dos componentes básicos, la altura dominante y el número de árboles por hectárea, lo cual permite que cuando se dispone de modelos eficientes de índice de sitio y mortalidad sea posible programar los aclareos en el tiempo. Publicaciones recientes (Schnell *et al.*, 2012; Castaño-Santamaría *et al.*, 2013; Corral-Rivas *et al.*, 2015) reportan el uso del ER en combinación con modelos de diámetro cuadrático y volumen, a fin de lograr una mejor percepción de las dimensiones del rodal de manera gráfica. Estos DMDs tienen dos ejes principales; en el

eje de las abscisas se presentan los valores de altura dominante del rodal y en el eje de ordenadas el número de árboles por hectárea. En este caso, sobre el diagrama se trazaron isolíneas de los valores del ER, diámetro cuadrático (Dq) y volumen (VHA). El diámetro cuadrático está en función del número de árboles y altura dominante, mientras que el volumen depende del diámetro cuadrático, número de árboles y altura dominante (López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Para obtener las isolíneas de Dq y VHA, se ajustaron ecuaciones de volumen y diámetro cuadrático (Ecuaciones 3 y 4) como un sistema de ecuaciones ajustadas de manera simultánea con la técnica SUR (regresiones aparentemente no relacionadas) del paquete estadístico SAS/ETS® 9.4 (SAS Institute Inc., 2016); dichas ecuaciones han sido utilizadas para construir DMDs basados en el ER (Escobedo, 2014; Corral-Rivas *et al.*, 2015). Dado que en el sistema de ecuaciones 3 y 4, el Dq es una variable dependiente en la Ecuación 3, mientras que en la Ecuación 4 es independiente, el ajuste de estas se hizo de manera simultánea para evitar la posible correlación de errores. En tanto que NA y H son variables exógenas debido a que se determinaron de manera independiente al sistema de ecuaciones (Álvarez-González *et al.*, 2007; Corral-Rivas *et al.*, 2015):

$$Dq = \beta_0 \times NA^{\beta_1} \times H^{\beta_2} \quad (3)$$

$$VHA = \beta_3 \times Dq^{\beta_4} \times NA^{\beta_5} \times H^{\beta_6} \quad (4)$$

Donde β_i son los coeficientes de regresión, $i = 0, \dots, 6$, las demás variables ya fueron descritas.

La Ecuación 3 permite estimar la producción del rodal, expresada en $m^3 \text{ ha}^{-1}$ (Escobedo, 2014; Corral-Rivas *et al.*, 2015). Las Ecuaciones 3 y 4 tienen implicaciones

biológicas y silvícolas ya que el diámetro cuadrático está en función de la calidad de sitio y esta expresada con la altura dominante, así el número de árboles por hectárea que a su vez está condicionado por las intervenciones silvícolas. Por otro lado, el volumen se relaciona de manera directa con el área basal y la altura dominante (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Las isolíneas de espaciamiento relativo se obtuvieron al despejar el NA de la Ecuación 1, tal y como se indica a continuación:

$$\begin{aligned}
 ER\% &= \frac{\sqrt{\frac{20000}{NA \times \sqrt{3}}}}{H} \times 100 \\
 &= \frac{ER\%}{100} \times H = \sqrt{\frac{20000}{NA \times \sqrt{3}}} \\
 &= \left(\frac{ER\%}{100} \times H\right)^2 = \left(\sqrt{\frac{20000}{NA \times \sqrt{3}}}\right)^2 \\
 &= \frac{ER\%^2}{100^2} \times H^2 = \frac{20000}{NA \times \sqrt{3}} \\
 &= ER\%^2 \times H^2 \times NA = \frac{20000 \times 100^2}{\sqrt{3}} \\
 NA &= \frac{20000 \times 100^2}{H^2 \times ER\%^2 \times \sqrt{3}} = \frac{2 \times 10^8}{H^2 \times ER\%^2 \times \sqrt{3}} \tag{5}
 \end{aligned}$$

Las isolíneas de Dq se obtuvieron al despejar el NA de la Ecuación 3 manteniendo constante Dq, de la siguiente manera:

$$Dq = \beta_0 \times NA^{\beta_1} \times H^{\beta_2}$$

$$NA^{\beta_1} = \frac{Dq}{\beta_0 \times H^{\beta_2}}$$

$$NA = \left(\frac{Dq}{\beta_0 \times H^{\beta_2}} \right)^{1/\beta_1} \quad (6)$$

Para las isolíneas de volumen, primero se sustituyó la Ecuación (3) en (4), luego se despejó el NA con un intervalo de valores de altura dominante y volumen del rodal de la siguiente forma:

$$VHA = \beta_3 \times Dq^{\beta_4} \times NA^{\beta_5} \times H^{\beta_6}$$

$$VHA = \beta_3 \times (\beta_0 \times NA^{\beta_1} \times H^{\beta_2})^{\beta_4} \times NA^{\beta_5} \times H^{\beta_6}$$

$$VHA = \beta_3 \times \beta_0^{\beta_4} \times NA^{\beta_1 \times \beta_4} \times H^{\beta_2 \times \beta_4} \times NA^{\beta_5} \times H^{\beta_6}$$

$$NA^{\beta_1 \times \beta_4 + \beta_5} = \left(\frac{VHA}{\beta_3 \times \beta_0^{\beta_4} \times H^{\beta_2 \times \beta_4 + \beta_6}} \right)$$

$$NA = \left(\frac{VHA}{\beta_3 \times \beta_0^{\beta_4} \times H^{\beta_2 \times \beta_4 + \beta_6}} \right)^{1/\beta_1 \times \beta_4 + \beta_5} \quad (7)$$

3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.5.1. DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE DENSIDAD MÁXIMA

Los parámetros estimados para la Ecuación 2 que describe la relación entre la densidad y la altura dominante, se presentan en el Cuadro 8. Se utilizaron estos valores de betas para estimar y trazar la línea de densidad máxima (LDM) sobre el DMD basado en el ER. La LDM permitió definir los valores (isolíneas) de ER en los que se debe mantener el rodal durante el turno (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

Cuadro 8. Estimadores de la ecuación 2 para la línea de densidad máxima.

Parámetro	Estimadores	EE	Valor t	Pr > t	RCME	R ²
β_0	5.116201	0.3128	37.66	<.0001	0.1114	0.59
β_1	-1.5104	0.0913	-16.55	<.0001		

EE: error estándar del estimador; t: valor que está asociado a la distribución de t de student del estimador del parámetro; Pr>|t|: valor de la probabilidad de t; RMCE: raíz del cuadrado medio del error y R²: coeficiente de determinación.

3.5.2. AJUSTE DE LAS RELACIONES ALOMÉTRICAS

Las variables utilizadas para estimar el diámetro cuadrático y volumen fueron estadísticamente confiables por los valores altos de coeficientes de determinación y menores valores de la raíz del cuadrado medio del error. Los estimadores asociados a las variables independientes fueron significativos en ambas ecuaciones (Cuadro 9).

Cuadro 9. Estadísticos y parámetros del ajuste simultáneo de las ecuaciones 3 y 4 para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.

Ecuación	Parámetros	Estimaciones	EE	Valor t	Pr> t	RMSE	R ²
3	β_0	18.9725	1.0295	18.43	<.0001	3.89	0.84
	β_1	-0.2543	0.0053	-47.91	<.0001		
	β_2	0.6082	0.0124	48.92	<.0001		
4	β_3	0.0004	0.0001	4.47	<.0001	57.63	0.94
	β_4	1.4999	0.0504	29.76	<.0001		
	β_5	0.6265	0.0202	31.04	<.0001		
	β_6	1.4176	0.0378	37.55	<.0001		

β_i : parámetros del modelo; EE: error estándar del estimador; t: valor asociado a la distribución t de student del estimador del parámetro; Pr>|t|: valor de la probabilidad de t, RCME: raíz del cuadrado medio del error y R²: coeficiente de determinación del ajuste.

Las ecuaciones 3 y 4 ajustadas de manera simultánea, explicaron de manera más confiable la variabilidad del volumen y diámetro cuadrático a diferencia del estudio realizado por Corral-Rivas *et al.* (2015) en un bosque mezclado de pino y latifoliadas en

donde se utilizó el ER ($R^2 = 0.81$ en volumen y 0.55 en diámetro cuadrático en sitios de productividad alta en Durango).

En bosques puros, estas relaciones pueden ser más precisas como lo sugiere el estudio para *Quercus robur* del norte y oeste de España en la que se reporta un coeficiente de determinación de 0.98 para volumen y 0.86 para diámetro cuadrático (Barrio y Álvarez, 2005). Los resultados de este estudio son similares también a los encontrados en bosques de *Pseudotsuga menziesii* del norte de España, donde en el caso del modelo de volumen se reportó un coeficiente de determinación de 0.99 y 0.82 para el diámetro cuadrático. No obstante, en este trabajo el sistema de Diámetro cuadrático y volumen logra un ajuste bueno, aun cuando existe mayor variabilidad debida a la diversa composición de especies (López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009).

Las ecuaciones obtenidas para estimar el diámetro cuadrático en los estudios referidos y en el presente trabajo, explican en menor grado la variabilidad observada a diferencia de la ecuación obtenida para estimar el volumen. Lo anterior, se puede corroborar con otros estudios realizados para coníferas, *Quercus* y latifoliadas (Barrio y Álvarez, 2005; Barrio-Anta *et al.*, 2006; Castedo-Dorado *et al.*, 2009; López-Sánchez y Rodríguez-Soalleiro, 2009; Corral-Rivas *et al.*, 2015).

El valor de la RCME de la ecuación para el volumen (57.63 m^3), resultó mayor con respecto a lo reportado en un estudio similar para un bosque de coníferas y latifoliadas de Durango (42.45 m^3) (Corral-Rivas *et al.*, 2015). Posiblemente, este alto valor en la RCME se debe al hecho de que en este trabajo se incluyó 11 especies de *Pinus*, varias

especies del género *Quercus*, latifoliadas, *Cupressus spp.* y *Abies oaxacana* de manera simultánea.

3.5.3. CONSTRUCCIÓN DEL DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD

El DMD se construyó en un gráfico con dos variables. En el eje de las abscisas se presenta la altura dominante que osciló entre 8 m y 44 m, y en el eje de las ordenadas se muestra a la densidad con un intervalo de 150 a 2,350 árboles por hectárea. Sobre estos ejes se colocaron las isolíneas con los valores de ER desde 9 % a 45 %. El 9 % representa a los rodales que se encuentran en densidad máxima, en tanto que el 45 % ilustra a los rodales que tienen mayor espacio de crecimiento (Figura 7). Los valores de ER de este estudio son similares a los utilizados para *Eucalyptus globulus* en el noroeste de España (10 % a 40 %) (Pérez-Cruzado *et al.*, 2011). Sin embargo, para el bosque mixto de Durango (Corral-Rivas *et al.*, 2015) los valores de ER (20 % a 100 %) fueron mayores con respecto a los reportados en este estudio.

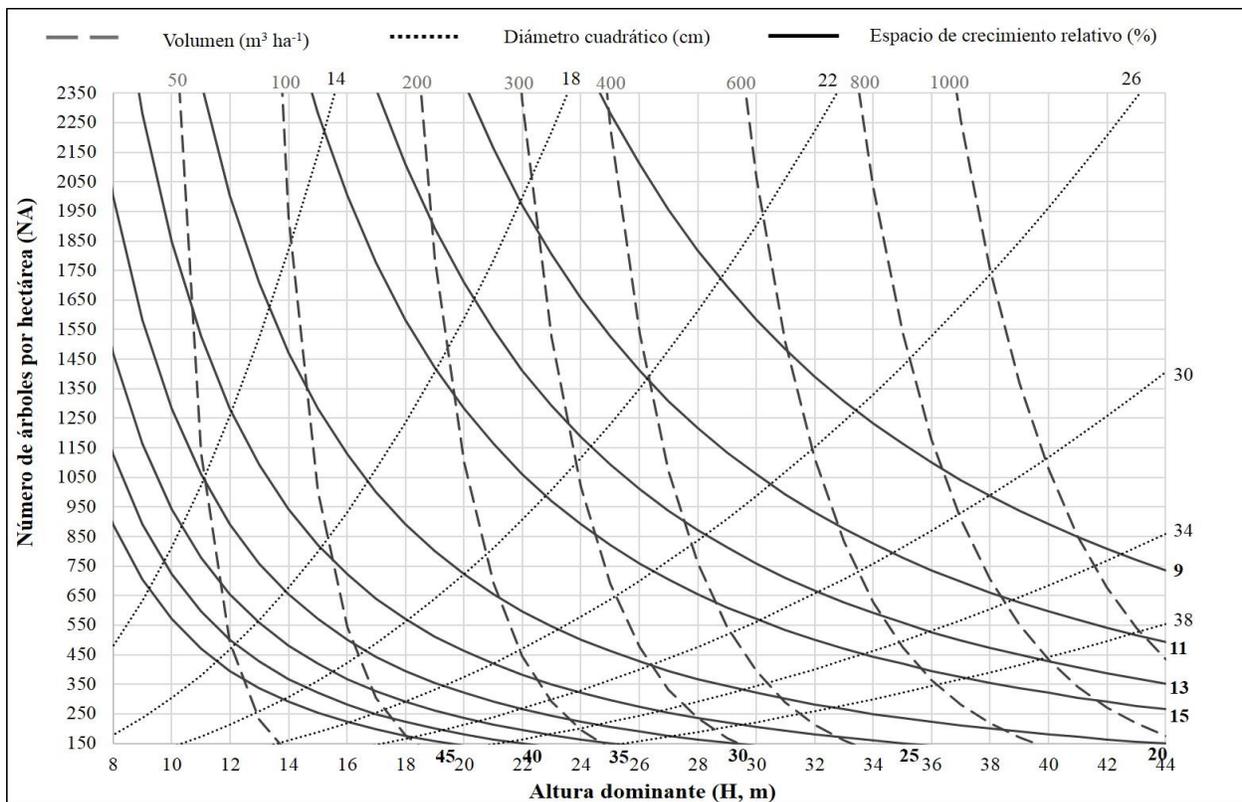


Figura 7. DMD mediante el ER para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.

En el DMD se presentan las isóneas de diámetro cuadrático (Dq) y volumen (VHA) obtenidas con las Ecuaciones 6 y 7. Al incorporar estas isóneas, se puede obtener una estimación del volumen a remover en las intervenciones silvícolas, al proporcionar información cuantitativa del rodal (Navarro *et al.*, 2001). Los valores de Dq oscilaron de 14 cm a 38 cm y el volumen de $100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a $1,000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Estos valores fueron similares a los reportados para *Pinus radiata* en Galicia, España (Dq , 10 cm a 50 cm y VHA , $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a $900 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) (Castedo-Dorado *et al.*, 2009). Los valores de estas variables pueden diferir por la composición de especies de los rodales, el grado de ocupación de los rodales y por las dimensiones de los individuos. Por ejemplo, en el DMD que desarrollaron Corral-Rivas *et al.* (2015) para rodales mixtos en Durango

(coníferas y latifoliadas), reportaron isóneas de diámetro cuadrático de 10 cm a 30 cm y para volumen de 100 m³ ha⁻¹ hasta 500 m³ ha⁻¹.

La línea de densidad máxima (LDM) se trazó en el DMD para definir la zona de mortalidad inminente que se encuentra entre el 11 % y 20 % de ER (Figura 8). El intervalo que abarca la zona indica que, a menor altura de los individuos hay mayor espacio de crecimiento.

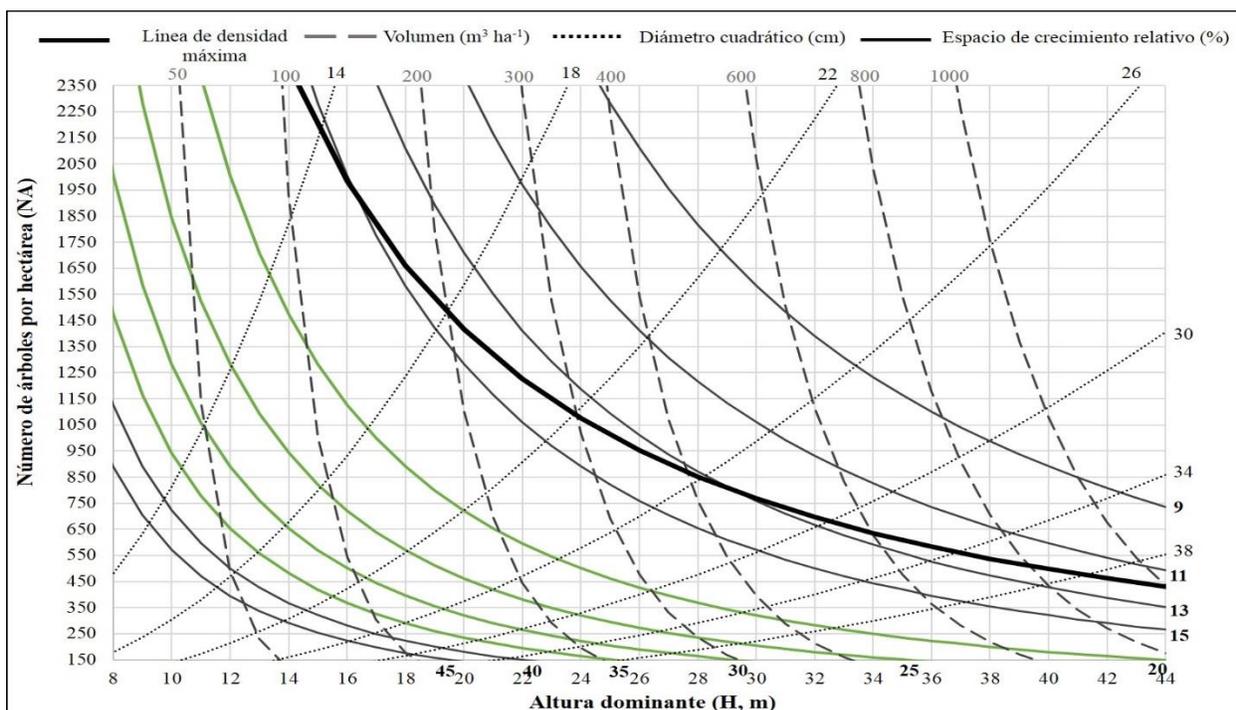


Figura 8. Diagrama de manejo de la densidad para el bosque mezclado con línea de densidad máxima y zona de crecimiento constante entre el 20 % y 35 % de ER.

La zona de crecimiento constante, localizada entre el 20 % y 35 % de ER (líneas continuas en verde), se definió a partir de la zona de mortalidad inminente y tomando como guía los valores de ER reportados para bosques mixtos y uniespecíficos (Barrio y Álvarez, 2005; Castaño-Santamaría *et al.*, 2013; Corral-Rivas *et al.*, 2015). El volumen promedio por hectárea observado en los rodales de estudio fue de 276.60 m³ ha⁻¹, lo que

indica que casi la mitad de los rodales del estudio están en la zona de mortalidad inminente. Dado que el número de árboles promedio observado fue 553 y una altura dominante de 23 m, la combinación de estas variables representa el límite superior de la zona de crecimiento constante.

La delimitación de la zona de crecimiento constante es relevante para planear los tratamientos silvícolas, por ejemplo los aclareos. Varios estudios han planeado aclareos entre el 20 % y 45 % de ER. Por ejemplo, en bosques de *Quercus robur* en Galicia y en bosques de *Quercus pyrenaica* Willd. en el noroeste de España, los aclareos se definieron entre el 20 % y 35 %, y el 20 % y 32 % de ER, respectivamente (Barrio y Álvarez, 2005; Castaño-Santamaría *et al.*, 2013). En bosques mixtos de Durango en México, la zona de crecimiento constante se ubicó entre el 30 % y el 45 % de ER (Corral-Rivas *et al.*, 2015).

3.5.4. USO DEL DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD

Para ejemplificar el uso del DMD basado en el ER, se plantearon secuelas de aclareos entre el 20 % y 35 % de ER (Figura 9). La isolínea del 20 % de ER representa el límite superior de la zona de crecimiento constante, es decir, el o los rodales se deben mantener por debajo de esta línea.

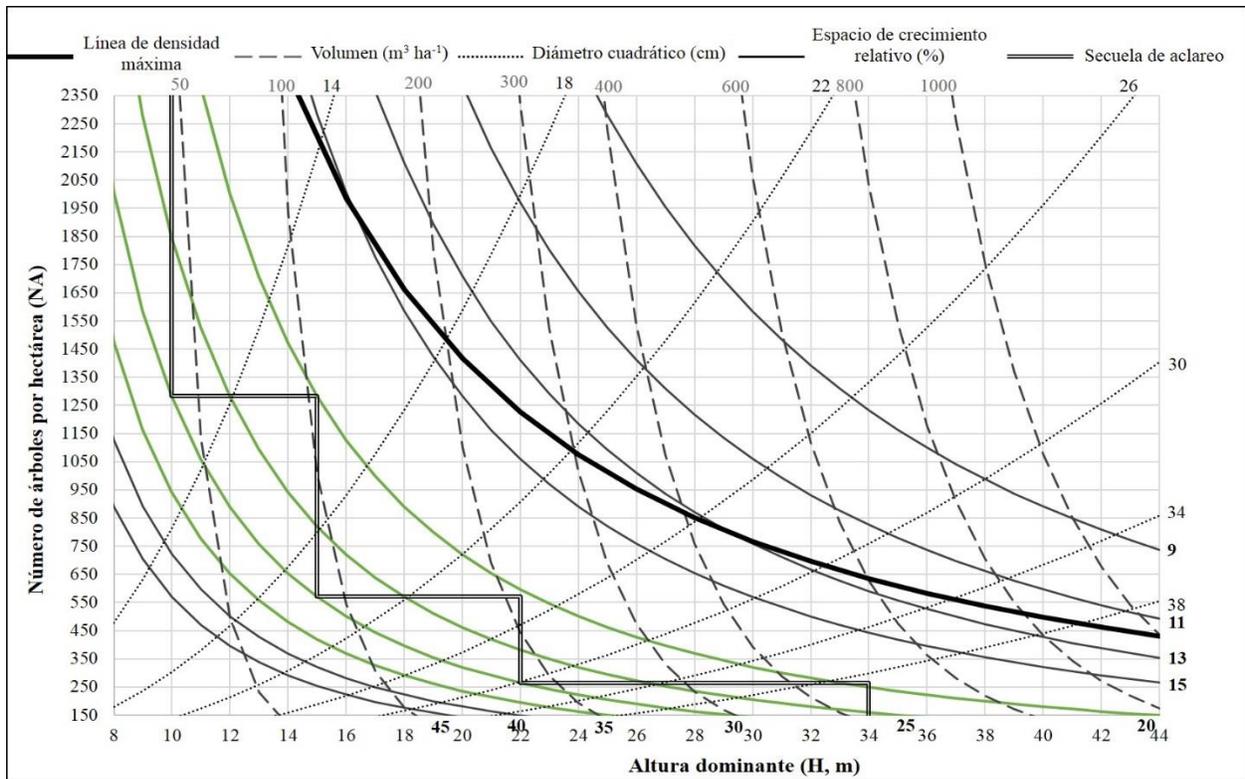


Figura 9. Secuelas de aclareo en el DMD con el uso del ER para el bosque mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca.

Los aclareos se planearon para un rodal de 2,887 árboles por hectárea, una altura dominante promedio de 10 m y un ER igual a 20 %. En la secuela se aplicaron tres aclareos sistemáticos, de forma tal que la densidad (individuos por hectárea) y altura dominante promedio después de cada aclareo obtenidos fueron las siguientes: primero, 1283 árboles por hectárea y 10 m; segundo, 570 árboles por hectárea y 15 m; tercero, 265 árboles por hectárea y 22 m. Para la cosecha final los 265 árboles por hectárea se dejaron crecer hasta alcanzar una altura de 34 m.

Las isolíneas de D_q y VHA nos proporcionan información en términos de producción total de la producción total del rodal. Por ejemplo, para la cosecha final se tienen 39.20 cm de diámetro cuadrático y $479.84 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de volumen como se observa en la Figura 9, ambas estimaciones se obtuvieron con los coeficientes de la Ecuación 3 y 4.

3.6. CONCLUSIONES

La interpretación del DMD basado en el espaciamiento relativo es compleja, debido a las variables que se incluyen, a diferencia de un DMD basado en el enfoque de Reineke o en el de Yoda. Entre las variables con mayor importancia se encuentran la altura dominante y el número de árboles por hectárea, las cuales no pueden ser excluidas en el DMD. El ER estimado representa un promedio global para las especies que están creciendo en el bosque de San Pedro el Alto. Adicionalmente, se recomienda considerar la diferencia en demanda de espacio de crecimiento o características micro-ambientales de las especies para regeneración y sobrevivencia (tolerantes e intolerantes a la sombra).

Una ventaja relativa del uso del índice de espaciamiento relativo, cuando se dispone de modelos eficientes de altura dominante, es que es posible estimar la longitud del periodo entre una intervención y otra, lo que permite realizar un manejo más apropiado.

Otro factor importante, es el uso de índices de densidad para definir la línea de densidad máxima del rodal, tal como en los DMDs basado en los enfoques de Reineke y Yoda. O bien se puede utilizar la Ecuación 2 utilizado en este estudio.

3.7. LITERATURA CITADA

Álvarez-González, J. G., R. Rodríguez-Soalleiro y A. Rojo-Alboreca. 2007. Resolución de problemas del ajuste simultáneo de sistemas de ecuaciones: heterocedasticidad y variables dependientes con distinto número de observaciones. Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales 23: 35-42.

- Arías A., D. 2004. Estudio de las relaciones altura-diámetro para seis especies maderables utilizadas en programas de reforestación en la Zona Sur de Costa Rica. *Kurú* 1: 1-11.
- Barrio A., M. and J. G. Álvarez G. 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged *Pedunculate oak* stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry* 78: 209-216.
- Barrio A., M., J. G. Álvarez G., I. J. Díaz-Maroto y C. A. López S. 2004. Relación altura-diámetro generalizada para *Quercus robur* L. en Galicia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 18: 141-146.
- Barrio-Anta, M., M. Á. Balboa-Murias, F. Castedo-Dorado, U. Diéguez-Aranda and J. G. Álvarez-González. 2006. An ecoregional model for estimating volumen, biomass and carbon pools in maritime pine stands in Galicia (northwestern Spain). *Forest Ecology and Management* 223: 24-34.
- Becking, J. H. 1953. Thinning research in forestry. *Netherland Journal of Agriculture Science* 1: 122-129.
- Beekhuis, J. 1966. Prediction of yield and increment in *Pinus radiata* stands in New Zealand. Technical paper No. 49. Forest Research Institute. New Zeland Forest Service.
- Bravo, F., G. Montero y M. Del Rio. 1997. Índices de densidad de las masas forestales. *Ecología* 11: 177-187.
- Bredenkamp, B. V. and H. E. Burkhart. 1990. An examination of spacing indices for *Eucalyptus grandis*. *Canadian Journal of Forest Research* 20: 1909-1916.

- Castaño-Santamaría, J., M. Barrio-Anta and P. Álvarez-Álvarez. 2013. Regional-scale stand density management diagrams for pyrenean oak (*Quercus pirenaica* Willd.) stands in north-west Spain. *©iForest – Biogeosciences and Forestry* 6: 113-122.
- Castedo-Dorado, F., F. Crecente-Campo, P. Álvarez-Álvarez and M. Barrio-Anta. 2009. Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry* 82: 1-16.
- Corral-Rivas, S., J. G. Álvarez-González, J. J. Corral-Rivas, C. Wehenkel y C. A. López-Sánchez. 2015. Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México. *Bosque* 36: 409-421.
- Escobedo S., A. 2014. Diagrama de manejo de densidad para rodales naturales del ejido El Largo, Chihuahua. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León, México. 47 p.
- García, O. 1981. An approximation for Beekhuis mortality model. *Forest Mensuration Branch Report No. 57*, New Zealand Forest Service, Forest Research Institute. 10 pp.
- Hart, H. M. J. 1928. Stem density and thinning: a pilot experiment to determine the best spacing and thinning method of teak. *Proefsta. Boschwesen, Batavia, Meded.* 21.
- Huang, S. and S. J. Titus. 1992. Comparison of nonlinear height-diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 1297-1304.
- Long, J. N. 1985. A practical approach to density management. *The Forestry Chronicle* 23: 23-26.

- López-Sánchez, C. and R. Rodríguez-Soalleiro. 2009. A density management diagram including stand stability and Crown fire risk for *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in Spain. Mountain Research and Development 29: 169-176.
- Navarro C., C., M. A. Herrera, F. Drake A. y P. J. Donoso. 2011. Diagrama de manejo de densidad y su aplicación a raleo en bosques de segundo crecimiento de *Drimys winteri* en el sur de Chile. Bosque 32: 175-186.
- Pérez-Cruzado, C., A. Merino and R. Rodríguez-Soalleiro. 2011. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crop in north-west Spain. Biomass and Bioenergy 35: 2839-2851.
- Reineke, L. H. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. Journal of Agricultural Research. 46: 627-638.
- SAS Institute Inc. 2016. SAS/ETS® 9.4 Configuration Guide for SAS® 9.4. Foundation for UNIX Enviroments, Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Schnell, S., C. Kleinn and J. G. Álvarez G. 2012. Stand density management diagrams for three exotic tree species in smallholder plantations in Vietnam. Small-scale Forestry 11: 509-528.
- Sharma, M. and J. Parton. 2007. Height-diameter equations for boreal tree species in Ontario using a mixed-effects modeling approach. Forest Ecology and Management 249: 187-198.
- Trincado, G. y C. Leal D. 2006. Ecuaciones locales y generalizadas de altura-diámetro para pino radiata (*Pinus radiata*). Bosque 1: 23-34.

- Vásquez C., W. 1986. Tres intensidades de raleo en *Pinus caribaea* var *Hondurensis*;
 Análisis de 10 años de crecimiento en un diseño cuadrado latino. Memoria de
 Congreso Forestal Nacional de Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de
 Investigación y Enseñanza, CATIE. Turrialba, Costa Rica. 15p.
- Yoda, K., T. Kira, H. Ogawa and K. Hozumi. 1963. Self-thinning in Overcrowded pure
 stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among
 higher plants XI). *Journal of Biology* 14: 107-129.
- Zhao, D., M. Kane and B. E. Borders. 2010. Development and applications of the relative
 spacing model for loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 259:
 1922-1929.

CAPÍTULO IV

USO DE LOS DIAGRAMAS DE MANEJO DE DENSIDAD

Para ejemplificar el uso de los diagramas de manejo de la densidad, se utilizaron datos del inventario operativo de San Pedro el Alto obtenidos con Relascopio de Bitterlich. De la base de datos, se identificó un rodal cuya densidad alta indicaba la necesidad de realizar un aclareo. El rodal seleccionado fue de 8.96 ha de superficie, y se compone del género *Pinus* (*Pinus douglasiana* Martínez, *Pinus teocote* Schltl. & Cham. y *Pinus spp.*), dos de *Quercus* que se distinguieron como *Quercus* comercial y *Quercus* no comercial y *Arbutus spp.* Las variables dasométricas del rodal por especie se presentan en el Cuadro 10. Al tratarse de un rodal con mezcla de especies, se pueden aplicar aclareos de manera que se cumpla con los objetivos de manejo. Por ejemplo, a este rodal se le van a aplicar aclareos suponiendo dos objetivos de manejo:

- 1) Mantener al rodal en la zona de crecimiento constante y preservar la composición de especies.
- 2) Mantener al rodal en la zona de crecimiento constante, aplicando aclareos que favorezcan a los pinos, de forma tal que para la cosecha final solo se tengan especies del género *Pinus*.

Cuadro 10. Características iniciales del rodal que se utilizó para la planeación de los aclareos.

Especie	NA (ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	VHA (m ³ ha ⁻¹)	Dq (cm)	H (m)
<i>Arbutus spp.</i>	280	5.78	64.96	16.22	18.7
<i>Pinus douglasiana</i>	482	16.44	194.38	20.83	23.6
<i>Pinus teocote</i>	8	0.89	8.98	36.95	20.2
<i>Pinus spp.</i>	34	4.67	50.18	41.83	21.5
<i>Quercus comercial</i>	226	4.00	49.06	15.00	20.4
<i>Quercus no comercial</i>	42	2.67	31.10	28.38	19.4
Total	1073	34.44	398.65	20.22	20.6

NA: número de árboles por hectárea, AB: área basal por hectárea, VHA: volumen por hectárea, Dq: diámetro cuadrático y H: altura dominante del rodal.

4.1. DMD BASADO EN EL ENFOQUE DE REINEKE

El número total inicial de árboles por hectárea del rodal fue de 1073 y el Dq de 20.22 cm. Con los estimadores de la Ecuación de Reineke utilizados para la construcción del DMD en el Capítulo II ($\beta_0 = 5.197, \beta_1 = -1.605$), se estimó el valor máximo de densidad para este rodal que sería de 1,262 árboles por hectárea ($N_{MAX} = 10^{5.197} \times 20.22^{-1.605} = 1,262$) y la densidad máxima al diámetro de referencia (Dq de 25 cm) es de 898 ($N_{MAX} = 10^{5.197} \times 25^{-1.605} = 898$), así que 898 es el 100 % de índice de densidad relativa (IDR max). Con estos valores se calculó el índice de densidad relativa del rodal ($IDRr = 1073 \times \left(\frac{25}{20.22}\right)^{-1.605} = 763$), de modo que el IDRr constituye el 85 % del IDR max ($\frac{763}{898} \times 100 = 85$). De acuerdo con las zonas de crecimiento definidas en los DMDs se sabe que el rodal se encuentra en la zona de mortalidad inminente, lo cual se corroboró de manera gráfica al ubicar al rodal en el DMD (Figura 10).

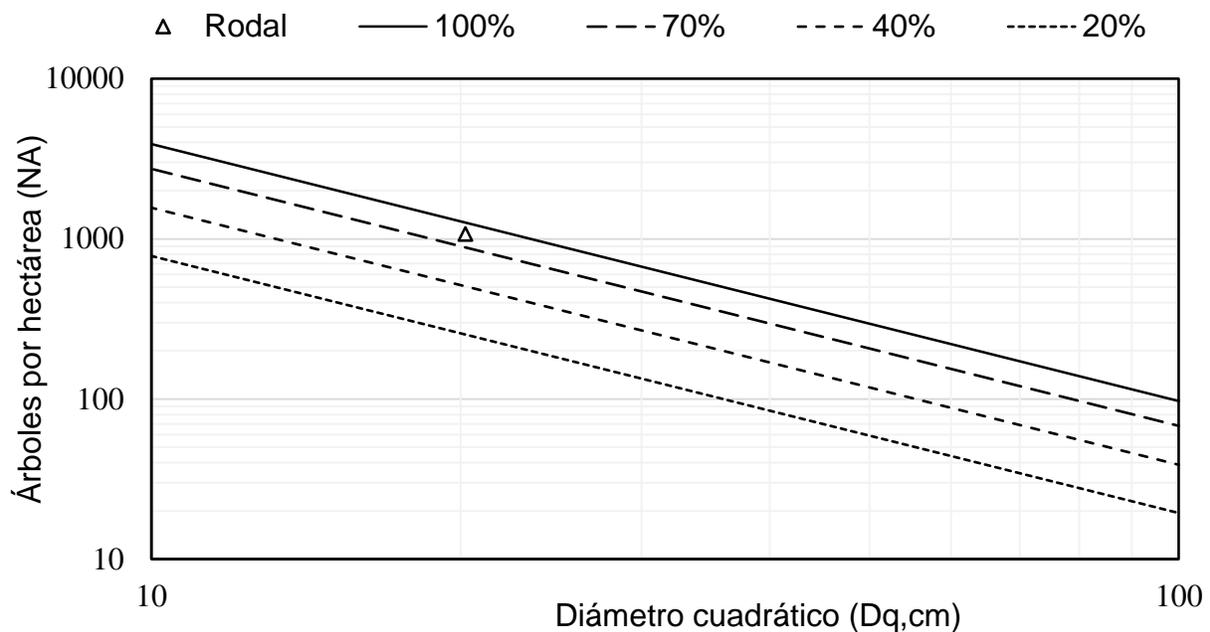


Figura 10. Ubicación del rodal (utilizado como ejemplo) en el DMD basado en el enfoque de Reineke.

Debido a que el rodal se ubica en la zona de mortalidad inminente y el objetivo de la secuela es mantenerlo en la zona de crecimiento constante, se recomienda aplicar un primer aclareo de tipo sistemático hasta que el rodal se ubique en el límite inferior de la zona de crecimiento constante. Se conoce que los límites inferior y superior de la zona de crecimiento constante corresponden al 40 % y al 70 % del IDR max, respectivamente. Por lo tanto, se estimó el IDR del límite inferior y superior de la zona de crecimiento constante para el ejemplo ($IDR_{inf} = 898 \times 0.4 = 359$ y $IDR_{sup} = 898 \times 0.7 = 629$). Con el IDR_{inf} se calculó el número de árboles residuales después del primer aclareo ($N_{resid} = 359 \times \left(\frac{20.22}{25}\right)^{-1.605} = 505$, y el valor del diámetro cuadrático se mantuvo. Después del aclareo, se dejó crecer al rodal hasta alcanzar el $IDR_{sup} = 629$ esto se logró

con un $Dq=28.70$ cm, que se estimó con $\left(D_{qp} = 25 \times \left(\frac{505}{629}\right)^{(1/-1.605)} = 28.70\right)$, D_{qp} : diámetro cuadrático proyectado.

La intensidad de corta se obtuvo de la diferencia entre el número de árboles iniciales y el número de árboles residuales, y el resultado se divide entre el número de árboles iniciales. Por ejemplo, para el primer aclareo la intensidad de corta fue 53 % que se derivó de $\left(IC = \frac{\left(\frac{505}{1073}\right)}{1073} \times 100 = 53\right)$.

La secuela de aclareos que maximiza el crecimiento para este rodal se presenta en el Cuadro 11. El número total de árboles, área basal por hectárea, diámetro cuadrático del rodal, tanto de la condición inicial como de la residual después de la aplicación de los aclareos y de manera gráfica, esto se ilustra en la Figura 11. La posibilidad se estimó utilizando una razón de volumen/área basal (VHA-AB) de $10.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Cuadro 11. Condición general de la secuela de aclareos utilizando el DMD basado en el enfoque de Reineke para un objetivo de manejo, mantener la composición de las especies.

Dq (cm)	NA ha ⁻¹	AB, ha ⁻¹	Tratamiento silvícola	IC (%)	Posibilidad (m ³ ha ⁻¹)	Remoción (m ³ ha ⁻¹)
20.22	1073	34.44			361.62	
20.22	505	16.21	Aclareo 1	53	170.21	191.42
28.70	505	32.67			343.04	
28.70	288	18.62	Aclareo 2	43	195.51	147.55
40.70	288	37.45			393.23	
40.70	164	21.38	Aclareo 3	43	224.49	168.75
57.80	164	43.11	Cosecha final		452.66	

Dq: diámetro cuadrático; NA: número de árboles; AB: área basal por hectárea e IC. Intensidad de corta en función del número de árboles removidos.

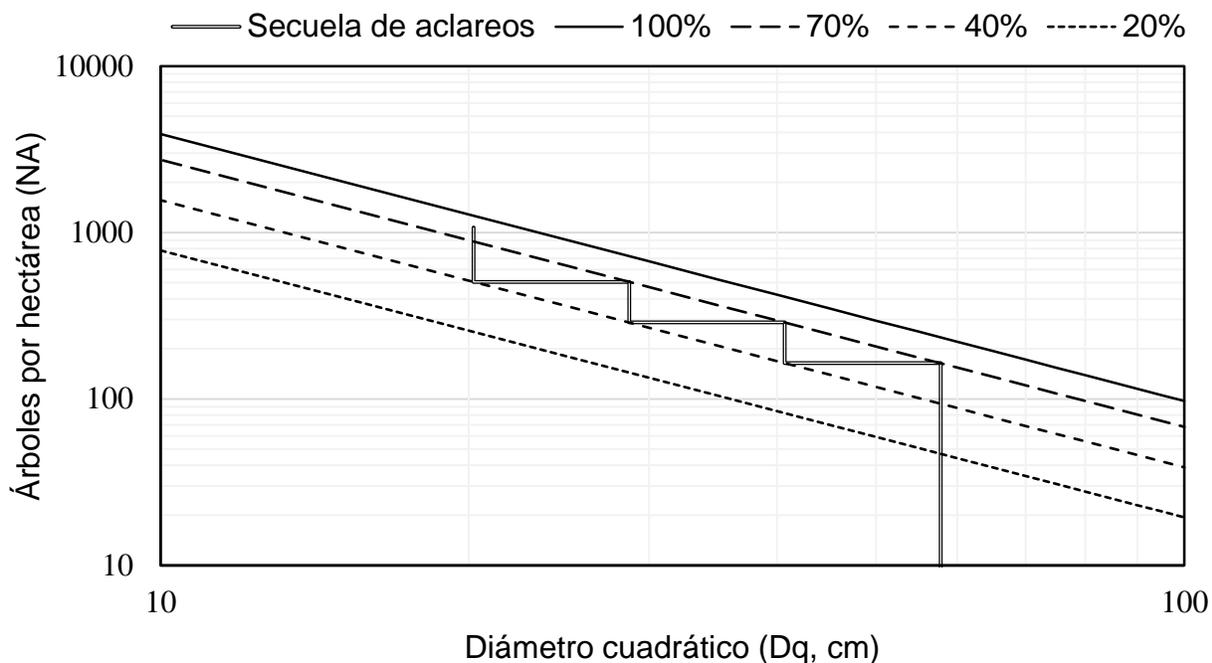


Figura 11. Secuela de aclareos para un rodal del bosque de San Pedro el Alto utilizando el DMD basado en el enfoque de Reineke.

En el DMD se aprecia que la intensidad de aclareo (número de árboles removidos) es muy fuerte en cada intervención, ya que las intensidades de corta superan el 40 %.

Para alcanzar el **primer objetivo**, se aplicaron aclareos sistemáticos en cada intervención. Esto es, se eliminó de manera proporcional el número de individuos en cada especie como en cada categoría diamétrica, de manera que se mantuvo el diámetro cuadrático promedio global (DqG) después de cada intervención (Cuadro 12).

Cuadro 12. Seguimiento de la secuela de aclareos y el crecimiento del rodal después de cada intervención.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	NA (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1073
	AB (m ² ha ⁻¹)	5.78	16.44	0.89	4.67	4	2.67	34.44
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.22
Primer aclareo	IC (%)	53	53	53	53	53	53	
	Nr (ha ⁻¹)	132	227	4	16	106	20	505
	ABr (m ² ha ⁻¹)	2.72	7.73	0.40	2.20	1.88	1.25	16.19
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.21
Crecimiento 1	NA (ha ⁻¹)	132	227	4	16	106	20	505
	AB (m ² ha ⁻¹)	5.49	15.59	0.81	4.43	3.79	2.52	32.67
	Dq (cm)	23.03	29.58	52.47	59.40	21.30	40.30	28.70
Segundo aclareo	IC (%)	43	43	43	43	43	43	
	Nr (ha ⁻¹)	75	129	2	9	61	11	288
	ABr (m ² ha ⁻¹)	3.13	8.90	0.46	2.53	2.16	1.44	18.63
	Dq (cm)	23.03	29.58	52.47	59.40	21.30	40.30	28.70
Crecimiento 2	NA (ha ⁻¹)	75	129	2	9	61	11	288
	AB (m ² ha ⁻¹)	6.30	17.89	0.93	5.09	4.35	2.89	37.45
	Dq (cm)	32.66	41.95	74.41	84.24	30.21	57.15	40.70
Tercer aclareo	IC (%)	43	43	43	43	43	43	
	Nr (ha ⁻¹)	43	74	1	5	35	6	164
	ABr (m ² ha ⁻¹)	3.59	10.19	0.53	2.90	2.48	1.65	21.34
	Dq (cm)	32.66	41.95	74.41	84.24	30.21	57.15	40.70
Cosecha final	NA (ha ⁻¹)	43	74	1	5	35	6	164
	AB (m ² ha ⁻¹)	7.24	20.55	1.07	5.85	5.00	3.32	43.03
	Dq (cm)	46.39	59.57	105.67	119.63	42.90	81.16	57.80

NA: número de árboles por hectárea, Dq: diámetro cuadrático, Nr: número de árboles residuales, ABr: área basal residual, *Arbutus*: *Arbutus* spp., *Pinus*¹: *Pinus douglasiana*, *Pinus*²: *Pinus teocote*, *Pinus*³: *Pinus* spp., *Quercus*¹: *Quercus* comercial y *Quercus*²: *Quercus* no comercial.

Para mantener la composición de especies, los aclareos se realizan de manera proporcional en términos de la densidad por especie. El procedimiento se detalla a continuación:

- 1) Con la intensidad de corta estimada en función del número de árboles, esta se aplicó directamente al número de árboles por especie de la condición inicial, para estimar el número de árboles de cada especie a dejar después de la intervención:
- a. $NA_{resp} = NA_{esp\ inicial} \times IC$, donde, NA_{resp} : número de árboles residuales por especie, $NA_{esp\ inicial}$: número de árboles por especie antes de la intervención e IC : intensidad de corta.

La suma de NA_{resp} en cada intervención debe dar como resultado el Número de árboles totales residuales que debe coincidir con lo indicado en el Cuadro 11.

- 2) En todas las intervenciones se asumió un aclareo sistemático por lo que el Dq por especie y el Dq global (DqG) permanecen constantes. Con esta información se calculó el AB por especie y a nivel global (rodal).
- 3) La estimación del diámetro cuadrático global proyectado (DqGP) que el rodal debe alcanzar para estar en el límite superior de la zona de crecimiento constante, se puede estimar de dos maneras:
- a. Utilizando el IDR_{sup} , diámetro cuadrático de referencia (D_o , 25 cm) y el número de árboles por hectárea (NA) con la expresión siguiente: $DqGP = D_o \times \left(\frac{NA}{IDR_{sup}}\right)^{1/-1.605}$ y
- b. Proyectando directamente en el DMD hasta que el rodal alcance el límite superior de la zona de crecimiento constante.
- 4) Para calcular el valor del Dq de cada especie cuando el rodal alcanza el límite superior (DqEP), se utilizó la razón entre el DqGP y el diámetro cuadrático global inicial DqGI. El resultado se multiplicó por el diámetro cuadrático inicial de cada especie (DqEI). Lo anterior se resume como sigue: $DqEP = (DqGP/DqGI) \times DqEI$. Por ejemplo, *Arbutus spp.* tuvo un Dq inicial igual a 16.22 cm, el DqGI del rodal fue de 20.22 cm y el DqGP

fue 28.70 cm, esto nos dio que el Dq proyectado de la especie fue: $Dq_{arbutusP} = \left(\frac{28.70}{20.22}\right) \times 16.22 = 23.03$. El procedimiento es el mismo para estimar el Dq proyectado de todas las especies, lo que garantiza que el cálculo del área basal total coincida con el área basal global estimada. Estos valores por especie se pueden observar en el Cuadro 12, donde se presenta el crecimiento del rodal después de ser intervenido.

5) Este proceso se repite para cada proyección en crecimiento del Dq por especie después de cada intervención, siempre y cuando la intensidad de corta que se aplique a cada especie sea la misma, como en este caso.

Para el **segundo objetivo**, se hizo un aclareo selectivo para favorecer a las especies de *Pinus*. El criterio fue eliminar la mayor cantidad de individuos y área basal de las especies de *Arbutus* y *Quercus* desde el primer aclareo. En el primer aclareo se aplicaron intensidades de cortas diferenciadas, para *Arbutus spp.* fue de 88 %, para *Quercus*¹ y *Quercus*² del 90 %, mientras que para cada una de las especies de *Pinus* solo se eliminó el 15 % (Cuadro 13). La intensidad de corta para cada especie pudo ser diferente (sujeta al criterio del silvicultor), dado que lo que interesa es que la suma de los árboles residuales de todas las especies de como resultado, el número de árboles que se debe dejar para estar en el límite inferior de la zona de crecimiento constante.

Con respecto al Dq, el aclareo se realiza bajo el supuesto de que se mantiene el Dq de cada especie. Sin embargo, el DqG es modificado (Cuadro 13). La estimación del DqG se realizó utilizando el área basal.

Previo al aclareo siguiente se deja crecer al rodal con el mismo número de árboles. La estimación del Dq proyectado por especie se logró mediante la expresión siguiente:

$$DqEP = DqEI \times \left(\frac{DqGP}{DqGI} \right) + \left(\frac{DqGP}{DqEI} \right)$$

El valor de $DqGP$ se presenta en el Cuadro 11. Es conveniente mencionar que este valor se utiliza como referencia para estimar el $DqEP$, y que posterior a la estimación de los $DqEPs$ se calcula el valor que toma el área basal por especie y global después del crecimiento del rodal; una vez que se estimó el área basal global del rodal que ya creció, se ree-calcula el valor del $DqGP$.

Cuadro 13. Seguimiento de la secuela de aclareos que favorece a las especies de *Pinus* y el crecimiento del rodal después de la aplicación de los aclareos.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	NA (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1073
	AB (m ² ha ⁻¹)	5.78	16.44	0.89	4.67	4	2.67	34.44
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.22
Primer aclareo	IC (%)	88	15	15	15	90	90	
	Nr (ha ⁻¹)	34	410	7	29	23	4	505
	ABr (m ² ha ⁻¹)	0.69	13.96	0.73	3.97	0.4	0.27	20.02
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	22.47
Crecimiento 1	NA (ha ⁻¹)	34	410	7	29	23	4	505
	AB (m ² ha ⁻¹)	1.2	24.04	1.26	6.84	0.69	0.46	34.48
	Dq (cm)	21.28	27.33	48.49	54.89	19.68	37.24	28.7
Segundo aclareo	IC (%)	100	35	40	40	100	100	
	Nr (ha ⁻¹)	0	266	4	17	0	0	288
	ABr (m ² ha ⁻¹)	0	15.63	0.75	4.1	0	0	20.48
	Dq (cm)	0	27.33	48.49	54.89	0	0	30.11
Crecimiento 2	NA (ha ⁻¹)	0	266	4	17	0	0	288
	AB (m ² ha ⁻¹)	0	30.91	1.41	7.65	0	0	39.97
	Dq (cm)	0	38.44	66.39	74.95	0	0	42.06
Tercer aclareo	IC (%)	0	44	40	40	0	0	
	Nr (ha ⁻¹)	0	149	2	10	0	0	162
	ABr (m ² ha ⁻¹)	0	17.31	0.85	4.59	0	0	22.74

Cuadro 13. Continuación...

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Tercer aclareo	Dq (cm)	0	38.44	66.39	74.95	0	0	42.28
	NA (ha ⁻¹)	0	149	2	10	0	0	162
Cosecha final	AB (m ² ha ⁻¹)	0	34.22	1.61	8.71	0	0	44.54
	Dq (cm)	0	54.05	91.62	103.22	0	0	59.17

IC: intensidad de corta, AB: área basal.

En el Cuadro 13 se presenta la información sobre la condición inicial del rodal, el de los aclareos, así como del crecimiento del rodal que ocurre después de cada intervención. A manera de ejemplo, se presenta cómo se estimó el valor del diámetro cuadrático de *Arbutus spp.*, después del primer aclareo del rodal utilizando la expresión ya proporcionada (párrafo anterior al Cuadro 13), el cual es el mismo procedimiento que se siguió para cada especie:

$$Dq_{ArbutusP} = 16.22 \times \left(\frac{28.70}{22.47} \right) + \left(\frac{16.22}{28.70} \right) = 21.28$$

En la Figura 12 se observa el seguimiento de la secuela de aclareos que favorece a *Pinus*, después de las intervenciones; se observa que el Dq global es mayor que en el aclareo sistemático, y que el rodal siempre se mantiene en la zona de crecimiento constante.

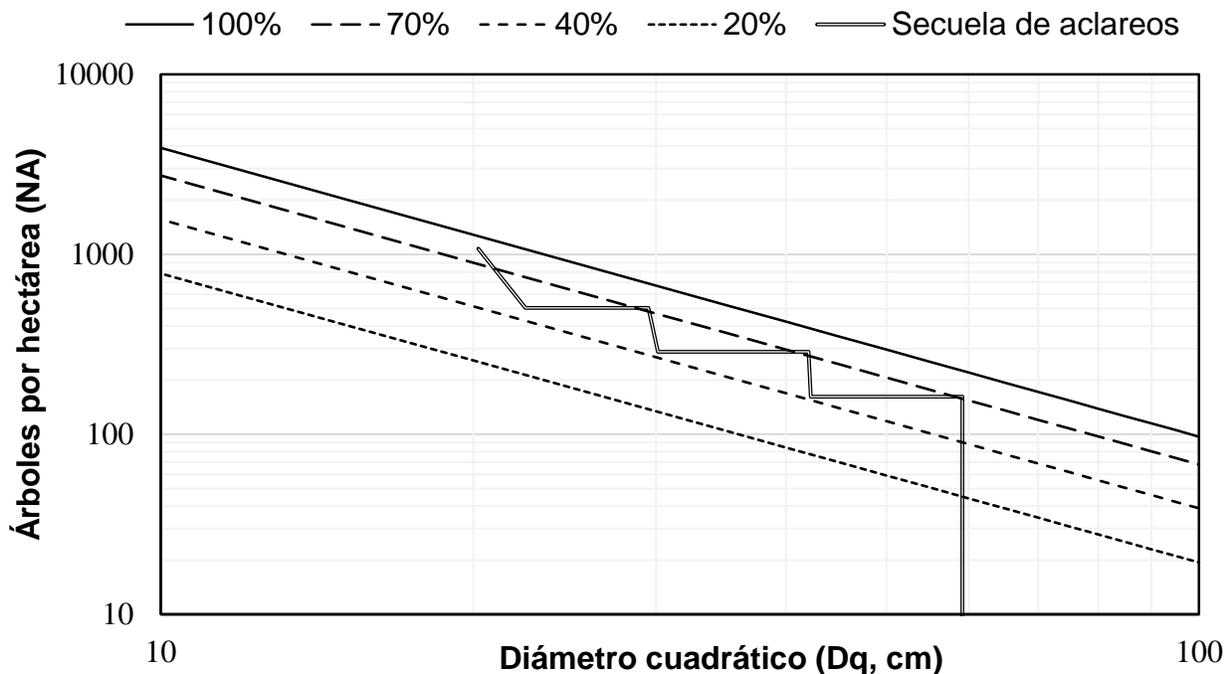


Figura 12. Secuela de aclareos para favorecer a *Pinus* usando el DMD basado en el enfoque de Reineke.

4.2. DMD BASADO EN EL ENFOQUE DE YODA

Similar al apartado anterior, se consideró el mismo rodal para ejemplificar el uso del DMD basado en el enfoque de Yoda; en este caso, el volumen promedio inicial por árbol fue de 0.37 m^3 . El primer paso para la planeación de los aclareos fue estimar el volumen promedio máximo ($V_{p_{MAX}}$), que se calculó utilizando el ajuste del modelo de Yoda (Capítulo II, $\beta_0 = 3.780$ y $\beta_1 = -1.367$) de forma tal que $V_{p_{MAX}} = 10^{3.780} \times 100^{-1.367} = 11.11$. También, se estimó el índice de densidad de Yoda del rodal ($IDY_r = 0.37 \times \left(\frac{100}{1073}\right)^{-1.367} = 9.53$), lo cual permitió conocer la proporción que representa el IDYr respecto del IDY max ($\frac{9.53}{11.11} \times 100 = 85$). Esta información se corroboró gráficamente en el DMD basado en el enfoque de Yoda (Figura 13).

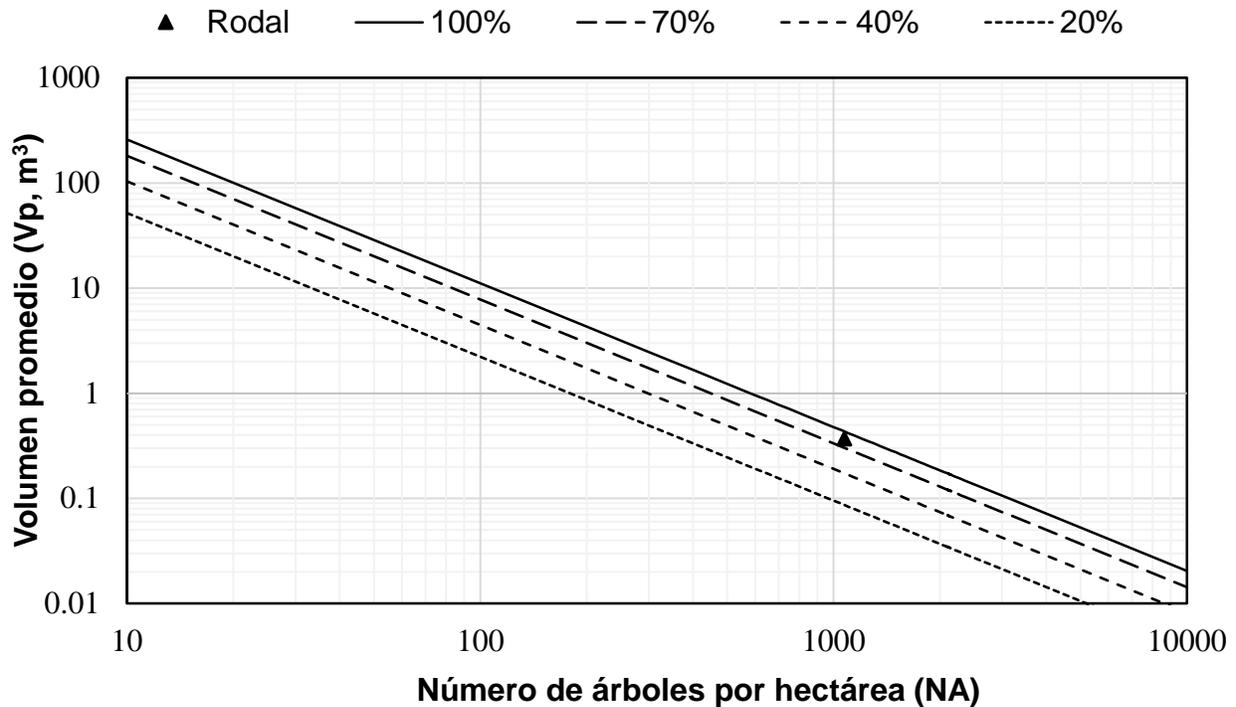


Figura 13. Ubicación inicial del rodal sobre el DMD basado en el enfoque de Yoda.

La ubicación del rodal utilizando como ejemplo en las Figuras 10 y 13, confirma que el rodal se encuentra en la zona de mortalidad inminente. A continuación, se va a plantear una secuela de aclareos usando el DMD basado en el enfoque de Yoda. Después de la ubicación del rodal en el DMD, se estimó el IDY que debe tener el rodal para mantenerse en la zona de crecimiento constante. El valor que tiene el IDY en el límite inferior de la zona de crecimiento constante se obtuvo con $IDY_{inf} = 11.11 \times 0.40 = 4.44$ y el valor de IDY en el límite superior de la zona de crecimiento constante fue $IDY_{sup} = 11.11 \times 0.70 = 7.77$.

El aclareo programado para este rodal es de tipo sistemático, manteniendo el volumen promedio por árbol (V_p) por especie, y recomendando bajar el índice de Yoda

del rodal de 9.53 a 4.44. El número de árboles residuales para este primer aclareo se estimó de la manera siguiente:

$$NA = 100 \times \left(\frac{0.37}{4.44} \right)^{1/-1.367} = 615$$

La intensidad de corta se estimó utilizando el procedimiento descrito en el uso de DMD basado en el enfoque de Reineke. La secuela de aclareo que maximiza la producción del rodal se presenta en el Cuadro 14, y su representación gráfica en la Figura 14.

Cuadro 14. Condición general de la secuela de aclareos utilizando el DMD basado en el enfoque de Yoda para un objetivo de manejo: mantener la composición de especies.

NA ha ⁻¹	Vp (m ³)	Tratamiento	IC %	Posibilidad (m ³ ha ⁻¹)	Remoción (m ³ ha ⁻¹)
1073	0.37			397.01	
615	0.37	Aclareo 1	43	227.55	169.46
615	0.65			399.75	
407	0.65	Aclareo 2	34	264.55	135.2
407	1.14			463.98	
270	1.14	Aclareo 3	34	307.80	156.18
270	2.00	Cosecha final		540.00	

NA: número de árboles por hectárea; Vp: volumen promedio por árbol; IC: intensidad de corta.

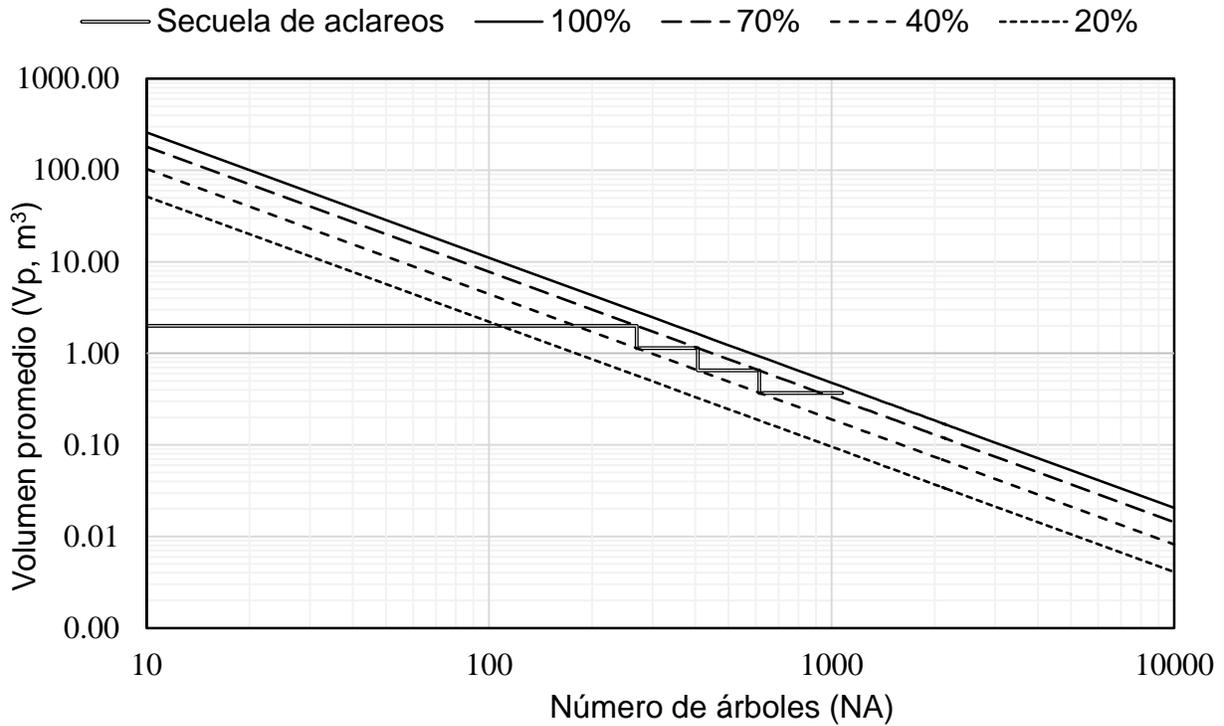


Figura 14. Secuela de aclareos sistemáticos que permite preservar la composición de especies usando el DMD basado en el enfoque de Yoda.

Para el **primer objetivo**, el aclareo fue sistemático. Primero se define la intensidad de corta a nivel global y se aplica para cada especie; la suma de los árboles residuales de cada especie debe sumar el número de árboles residuales a nivel global que se estimó y se presentó en el Cuadro 14.

Cuadro 15. Secuela de aclareos sistemáticos con el objetivo de mantener la composición de especies del rodal con el DMD basado en el enfoque de Yoda.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus spp.</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	NA (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1073
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	64.96	194.38	8.98	50.18	49.06	31.1	398.65
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.22
	Vp (m3)	0.23	0.40	1.12	1.48	0.22	0.74	0.37
Primer aclareo	IC (%)	43	43	43	43	43	43	
	Nr (ha ⁻¹)	160	276	5	19	129	24	614
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	37.17	111.23	5.14	28.71	28.07	17.80	228.12
	Vp (m3)	0.23	0.40	1.12	1.48	0.22	0.74	0.37
Crecimiento 1	NA (ha ⁻¹)	160	276	5	19	129	24	614
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	65.03	194.60	8.99	50.24	49.12	31.14	399.10
	Vp (m3)	0.41	0.71	1.96	2.58	0.38	1.30	0.65
Segundo aclareo	IC (%)	34	34	34	34	34	34	
	Nr (ha ⁻¹)	106	183	3	13	86	16	407
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	43.11	128.99	5.96	33.30	32.56	20.64	264.55
	Vp (m3)	0.41	0.71	1.96	2.58	0.38	1.30	0.65
Crecimiento 2	NA (ha ⁻¹)	106	183	3	13	86	16	407
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	75.61	226.23	10.45	58.40	57.10	36.20	463.98
	Vp (m3)	0.71	1.24	3.44	4.53	0.67	2.27	1.14
Tercer aclareo	IC (%)	34	34	34	34	34	34	
	Nr (ha ⁻¹)	70	121	2	9	57	11	270
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	50.16	150.08	6.93	38.74	37.88	24.01	307.80
	Vp (m3)	0.71	1.24	3.44	4.53	0.67	2.27	1.14
Cosecha final	NA (ha ⁻¹)	70	121	2	9	57	11	270
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	87.99	263.30	12.16	67.97	66.46	42.13	540.00
	Vp (m3)	1.25	2.17	6.04	7.94	1.17	3.99	2

NA: número de árboles por hectárea; VHA: volumen por hectárea; IC: intensidad de corta.

Después de cada aclareo, el volumen promedio por árbol se mantiene para cada especie y, por consiguiente, el volumen promedio por árbol a nivel rodal también se mantiene (Cuadro 15). Después del primer aclareo, el rodal se deja incrementar a los árboles en términos de volumen promedio por árbol, manteniendo el número de árboles

residuales. Para esto, es necesario conocer el volumen promedio por árbol a nivel rodal, para poder estimar cuánto va a crecer el volumen promedio por árbol por especie. Estos valores se presentan en el Cuadro 14. Después, se obtiene la razón entre el volumen promedio por árbol proyectado entre el volumen promedio por árbol inicial, el resultado se multiplica por el valor del volumen promedio inicial de cada especie. A modo de ejemplo, el volumen promedio del rodal después del primer aclareo fue de 0.37 m³ y el volumen promedio proyectado antes del segundo aclareo fue de 0.65 m³. El valor del volumen promedio por árbol proyectado de cada especie se obtuvo como se indica:

$$V_{pEspP} = (V_{pGP}/V_{pGI}) \times V_{pEI}$$

El volumen promedio de *Arbutus* proyectado se estimó como

$$V_{pArbutusP} = (0.65/0.37) \times 0.23 = 0.41 \text{ m}^3$$

Este procedimiento se siguió para todas las especies y después de cada aclareo.

El DMD basado en el enfoque de Yoda sugiere tres aclareos para el rodal seleccionado, forma igual que el DMD basado en el enfoque de Reineke. Sin embargo, el DMD basado en Yoda sugiere que las intensidades de los aclareos sean menores con respecto a aquellas obtenidas bajo el enfoque de Reineke. Para la cosecha final se dejan 270 árboles por hectárea con un volumen promedio por árbol de 2 m³ que da como resultado un volumen total a cosechar de 540 m³ por hectárea. En cambio, Reineke sugiere dejar 164 árboles por hectárea para la cosecha final, con Dq promedio de 57.8 cm y la posibilidad en la cosecha final es de 452.66 m³ por hectárea.

Para cumplir con el **segundo objetivo**, en el primer aclareo se cosecha el 78 % de los árboles de *Arbutus spp.*, 80 % de cada tipo de *Quercus* y para cada especie de *Pinus* solo se redujo el 5 %. La intensidad de corta aplicada a cada especie puede variar ya

que no hay una regla que indique cuál va a ser la intensidad de corta por especie, porque esto se va a definir en función del objetivo que se quiera cumplir. Lo importante es mantener al rodal en la zona de crecimiento constante. Dado que, la intensidad de corta por especie en cada intervención es diferente, para estimar el volumen promedio por árbol que debe crecer cada especie para el siguiente aclareo, es necesario conocer el volumen total que se desea alcanzar a nivel rodal y la razón que existe entre el volumen total a nivel rodal y el volumen total por especie después del aclareo.

A modo de ilustración, a continuación se detalla el procedimiento utilizado para la estimación del volumen promedio por árbol por especie cuando se dejó crecer el rodal después de realizar el aclareo. Primero, se obtuvo la razón entre el volumen total del rodal con el volumen total de cada especie en el primer aclareo; después, se estimó el volumen que se espera el rodal alcance para ubicarse en el límite superior de la zona de crecimiento constante; tercero, se multiplica la razón estimada en el primer paso por el volumen total a nivel rodal esperado. Para *Arbutus spp.*, el volumen total proyectado se obtuvo de:

$$V_{ArbutusP} = (271.19/14.29) \times 399.10 = 21.03 \text{ m}^3$$

Al dividir el volumen total de *Arbutus* entre el número de árboles de la especie se obtiene el volumen promedio que tiene cada individuo de esta especie:

$$V_{pArbutus} = \frac{21.03}{62} = 0.34 \text{ m}^3.$$

Este procedimiento se realizó para cada especie después de cada aclareo para conocer el crecimiento del rodal previo al siguiente aclareo o cosecha final, los resultados se presentan en el Cuadro 16.

Cuadro 16. Secuela de aclareo que se realizó con el objetivo de tener solo especies de *Pinus* en la cosecha final usando el DMD basado en el enfoque de Yoda.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus spp.</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	N (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1073
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	64.96	194.38	8.98	50.18	49.06	31.1	398.65
	Vp (m ³)	0.23	0.40	1.12	1.48	0.22	0.74	0.37
Primer aclareo	IC (%)	78	5	5	5	80	80	
	Nr (ha ⁻¹)	62	458	8	32	45	8	614
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	14.29	184.66	8.53	47.67	9.81	6.22	271.19
	Vp (m ³)	0.23	0.40	1.12	1.48	0.22	0.74	0.44
Crecimiento 1	Nr (ha ⁻¹)	62	458	8	32	45	8	614
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	21.03	271.76	12.55	70.16	14.44	9.15	399.10
	Vp (m ³)	0.34	0.59	1.65	2.17	0.32	1.09	0.65
Segundo aclareo	IC (%)	20	35	40	40	20	100	
	Nr (ha ⁻¹)	49	298	5	19	36	0	407
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	16.83	176.65	7.53	42.09	11.55	0.00	254.65
	Vp (m ³)	0.34	0.59	1.65	2.17	0.32	1.09	0.63
Crecimiento 2	Nr (ha ⁻¹)	49	298	5	19	36	0	407
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	30.66	321.85	13.73	76.70	21.05	0.00	463.98
	Vp (m ³)	0.62	1.08	3.01	3.96	0.58		1.14
Tercer aclareo	IC (%)	100	15	30	30	100	0	
	Nr (ha ⁻¹)	0	253	3	14	0	0	270
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	273.58	9.61	53.69	0	0	336.87
	Vp (m ³)	0.62	1.08	3.01	3.96	0.58	0	1.25
Cosecha final	Nr (ha ⁻¹)	0	253	3	14	0	0	270
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	438.13	15.39	85.98	0	0	539.50
	Vp (m ³)	0	1.73	4.82	6.34	0	0	2

4.3. DMD BASADO EN EL ESPACIAMIENTO RELATIVO

Para este ejemplo, primero se estimó el valor de ER del rodal como se indica a continuación:

$$ER \% = \frac{\sqrt{\frac{20000}{1073 \times \sqrt{3}}}}{20.6} \times 100 = 16 \%$$

También, se puede graficar la densidad y altura dominante del rodal en el DMD basado en el ER. De acuerdo con la definición de las zonas de crecimiento para este tipo de DMD (Capítulo III), se deduce que el rodal se encuentra en la zona de mortalidad inminente. Así como los DMDs derivados con los enfoques de Reineke y Yoda se utilizan para planear aclareos con diversos objetivos, el DMD basado en el ER también permite plantear diferentes escenarios de secuelas de aclareos. A continuación se presentan los dos casos de aclareos para el rodal utilizado como ejemplo, ya desarrollados con los DMDs de Reineke y Yoda, pero ahora usando el DMD basado en el ER.

El primer escenario de secuela de aclareos es con el objetivo de mantener la composición del bosque hasta la cosecha final, y manejar el rodal en la zona de crecimiento constante durante el turno. Aunque la zona de crecimiento constante se definió entre el 20 % y 35 % de ER (Capítulo III), esto no indica que necesariamente se maneje al rodal entre estos límites. La importancia de estos límites es evitar mantener el rodal sobre la línea de densidad máxima. Por ejemplo, la secuela de aclareo se ejemplificó entre el 20 % y 25 % de ER. Para que el rodal tenga 20 % de ER con 20.6 m de altura dominante promedio, se debe reducir la densidad de 1073 a 448 árboles por hectárea, esta estimación se realizó con la Ecuación 5 indicada en el Capítulo III. El supuesto principal es que cada especie mantiene la altura dominante promedio después de cada aclareo. La estimación del incremento en la altura dominante de cada especie al momento de dejar crecer el rodal, se realizó mediante la razón que existe entre la altura dominante promedio proyectada del rodal y la altura dominante después del aclareo del rodal, lo que multiplicado por la altura dominante promedio por especie permite conocer la altura dominante promedio a nivel especie. Los valores de D_q y VHA

se estimaron con las Ecuaciones 3 y 4 del Capítulo III, utilizando los estimadores presentado en el Cuadro 9.

La secuela de aclareo que mantiene la composición de especies se presenta en el Cuadro 17, con los dos aclareos previos a la cosecha final con 288 árboles y 32 m de altura dominante promedio, lo que gráficamente se puede observar en la Figura 15.

Cuadro 17. Secuela de aclareo para el rodal con el objetivo de mantener la composición de especies utilizando el DMD basado en el espaciamiento relativo.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus spp.</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	NA (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1072
	H (m)	18.7	23.6	20.2	21.5	20.4	19.4	20.6
	ER (%)	34	21	188	86	35	85	16
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.22
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	64.96	194.38	8.98	50.18	49.06	31.1	398.65
	AB (m ² ha ⁻¹)	5.78	16.44	0.89	4.67	4	2.67	34.44
Primer aclareo	IC (%)	58	58	58	58	58	58	
	NA (ha ⁻¹)	118	202	3	14	95	18	450
	H (m)	18.7	23.6	20.2	21.5	20.4	19.4	20.6
	ER (%)	53	32	290	132	54	132	25
	Dq (cm)	33.51	33.63	86.75	62.36	37.31	55.52	25.26
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	97.65	191.84	48.9	80.62	113.47	66.82	170
Crecimiento 1	AB (m ² ha ⁻¹)	10.37	17.97	1.98	4.36	10.37	4.27	22.56
	NA (ha ⁻¹)	118	202	3	14	95	18	450
	H (m)	22.69	28.64	24.51	26.09	24.76	23.54	25
	ER (%)	44	26	239	109	45	109	20
	Dq (cm)	37.7	37.83	97.59	70.15	41.98	62.46	28.42
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	153.3	301.18	76.77	126.56	178.14	104.9	266.89
Segundo aclareo	AB (m ² ha ⁻¹)	13.12	22.74	2.51	5.52	13.13	5.4	28.55
	IC (%)	36	36	36	36	36	36	
	NA (ha ⁻¹)	75	129	2	9	61	11	288
	H (m)	22.69	28.64	24.51	26.09	24.76	23.54	25
	ER (%)	55	33	299	136	56	136	25

Cuadro 17. Continuación...

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus spp.</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Segundo aclareo	Dq (cm)	42.23	42.38	109.31	78.59	47.02	69.96	31.84
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	137.41	269.97	68.82	113.45	159.69	94.04	239.24
	AB (m ² ha ⁻¹)	10.54	18.26	2.02	4.43	10.54	4.34	22.93
Cosecha final	NA (ha ⁻¹)	75	129	2	9	61	11	288
	H (m)	29.05	36.66	31.38	33.4	31.69	30.14	32
	ER (%)	43	26	234	106	44	106	20
	Dq (cm)	49.07	49.24	127.02	91.32	54.64	81.3	36.99
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	244.24	479.84	122.31	201.64	283.82	167.14	425.22
	AB (m ² ha ⁻¹)	14.23	24.66	2.72	5.98	14.24	5.86	30.96

NA: número de árboles por hectárea; H: altura dominante; ER: espaciamiento relativo; Dq: diámetro cuadrático; VHA: volumen por hectárea; AB: área basal.

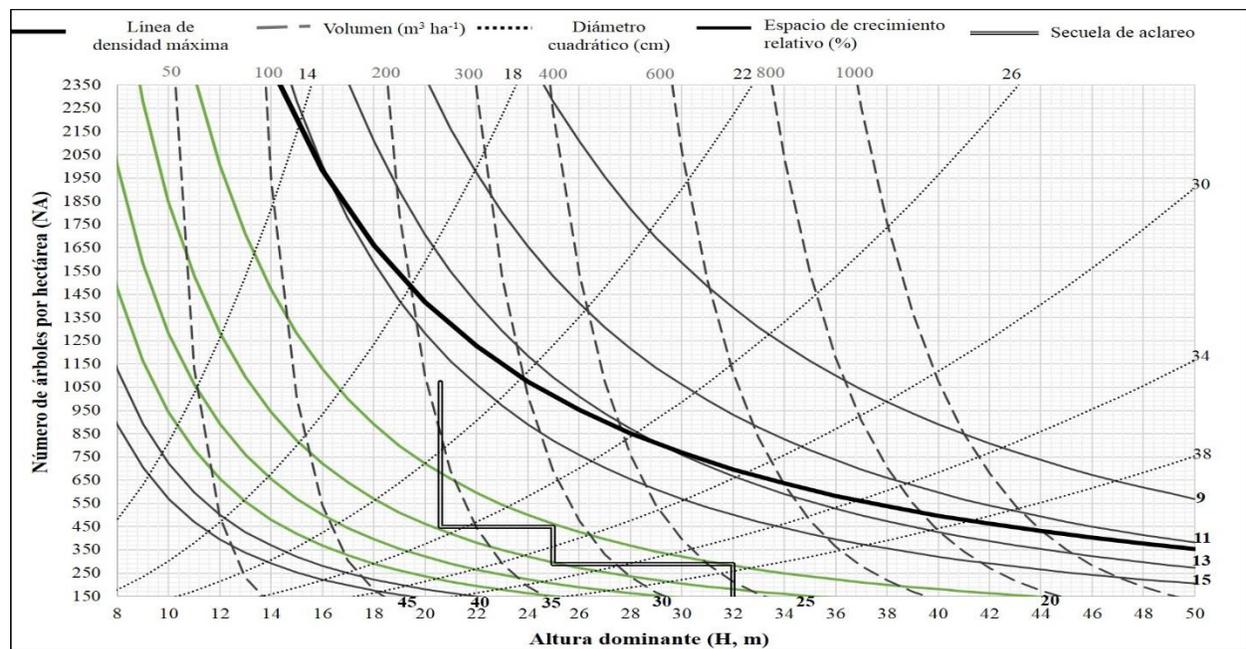


Figura 15. Secuela de aclareos en un rodal mezclado de San Pedro el Alto, Oaxaca, usando el DMD basado en el ER con el objetivo de mantener la composición de especies.

El **segundo** escenario corresponde a una secuela de aclareos cuyo objetivo principal es que en la cosecha final el rodal tenga solo especies de *Pinus*. Para esto se propone

aplicar diferentes intensidades de corta a las especies desde el primer aclareo. Similar al procedimiento realizado en los dos DMDs anteriores, no hay receta sobre la intensidad de corta a aplicar por especie, y se puede usar cualquier combinación de intensidades de corta, siempre y cuando se eliminen las especies de no interés y se esté manejando al rodal en la zona de crecimiento constante.

En el Cuadro 18 se presenta la secuela de aclareo derivada para cumplir el objetivo propuesto. Se observa que en el primer aclareo se decidió eliminar a *Arbutus spp.* y a *Quercus*, mientras que para *Pinus douglasiana* se removió solo el 15 % y para *Pinus teocote* y *Pinus spp.*, el 10 %. En *Pinus* se realizó un aclareo mixto de manera tal que se mantuvo la altura dominante de cada una de las especies. La proyección de la altura dominante en el crecimiento del rodal se obtuvo a partir de la razón entre la altura dominante del rodal de la condición inicial y la altura dominante de cada especie en la condición inicial, y se multiplicó por la altura dominante de cada especie después del primer aclareo. Las variables Dq y VHA se estimaron de la misma manera que en el caso anterior. Aunque el número de árboles y la altura dominante que tuvo el rodal para la cosecha final es la misma que se tuvo en el caso anterior, el patrón de distribución de la secuela de aclareos es diferente, pero el rodal se mantuvo en la zona de crecimiento constante (Figura 16).

Cuadro 18. Secuela de aclareo para un rodal de San Pedro el Alto, Oaxaca, cuyo objetivo es mantener solo especies de *Pinus* para la cosecha final.

Tratamiento	Variables	<i>Arbutus spp.</i>	<i>Pinus</i> ¹	<i>Pinus</i> ²	<i>Pinus</i> ³	<i>Quercus</i> ¹	<i>Quercus</i> ²	Total
Condición inicial	NA (ha ⁻¹)	280	482	8	34	226	42	1072
	H (m)	18.7	23.6	20.2	21.5	20.4	19.4	20.6
	ER (%)	34	21	188	86	35	85	16
	Dq (cm)	16.22	20.83	36.95	41.83	15	28.38	20.22
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	64.96	194.38	8.98	50.18	49.06	31.1	398.65
	AB (m ² ha ⁻¹)	5.78	16.44	0.89	4.67	4	2.67	34.44
Primer aclareo	IC (%)	100	15	10	10	100	100	
	NA (ha ⁻¹)	0	410	7	31	0	0	448
	H (m)	0	23.6	20.2	21.5	0	0	20.6
	ER (%)	0	22	198	90	0	0	25
	Dq (cm)	0	28.10	71.45	51.37	0	0	25.30
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	228.05	58.95	97.19	0	0	169.77
Crecimiento 1	AB (m ² ha ⁻¹)	0	25.42	2.89	6.34	0	0	22.50
	NA (ha ⁻¹)	0	410	7	31	0	0	448
	H (m)	0	27.0	24.5	26.1	0	0	25
	ER (%)	0	20	163	74	0	0	20
	Dq (cm)	0	30.53	80.38	57.79	0	0	28.46
	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	313.04	92.55	152.57	0	0	266.53
Segundo aclareo	AB (m ² ha ⁻¹)	0	29.99	3.65	8.03	0	0	28.47
	IC (%)	0	30	100	100	0	0	
	NA (ha ⁻¹)	0	287	0	0	0	0	287
	H (m)	0	27.04	0	0	0	0	27.04
	ER (%)	0	23	0	0	0	0	23
	Dq (cm)	0	33.43	0	0	0	0	33.43
Cosecha final	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	286.84	0	0	0	0	286.84
	AB (m ² ha ⁻¹)	0	25.17	0	0	0	0	25.17
	NA (ha ⁻¹)	0	286.79	0	0	0	0	288
	H (m)	0	32	0	0	0	0	32
	ER (%)	0	20	0	0	0	0	20
	Dq (cm)	0	37.03	0	0	0	0	37.03
Cosecha final	VHA (m ³ ha ⁻¹)	0	424.78	0	0	0	0	424.78
	AB (m ² ha ⁻¹)	0	30.89	0	0	0	0	30.89

NA: número de árboles por hectárea; H: altura dominante; ER: espaciamiento relativo; Dq: diámetro cuadrático; VHA: volumen por hectárea; AB: área basal.

Para la cosecha final, el rodal tuvo 424.78 m³ por hectárea de volumen y 37.03 cm de diámetro cuadrático, estos valores coinciden con las isólineas de Dq y VHA trazados en el DMD.

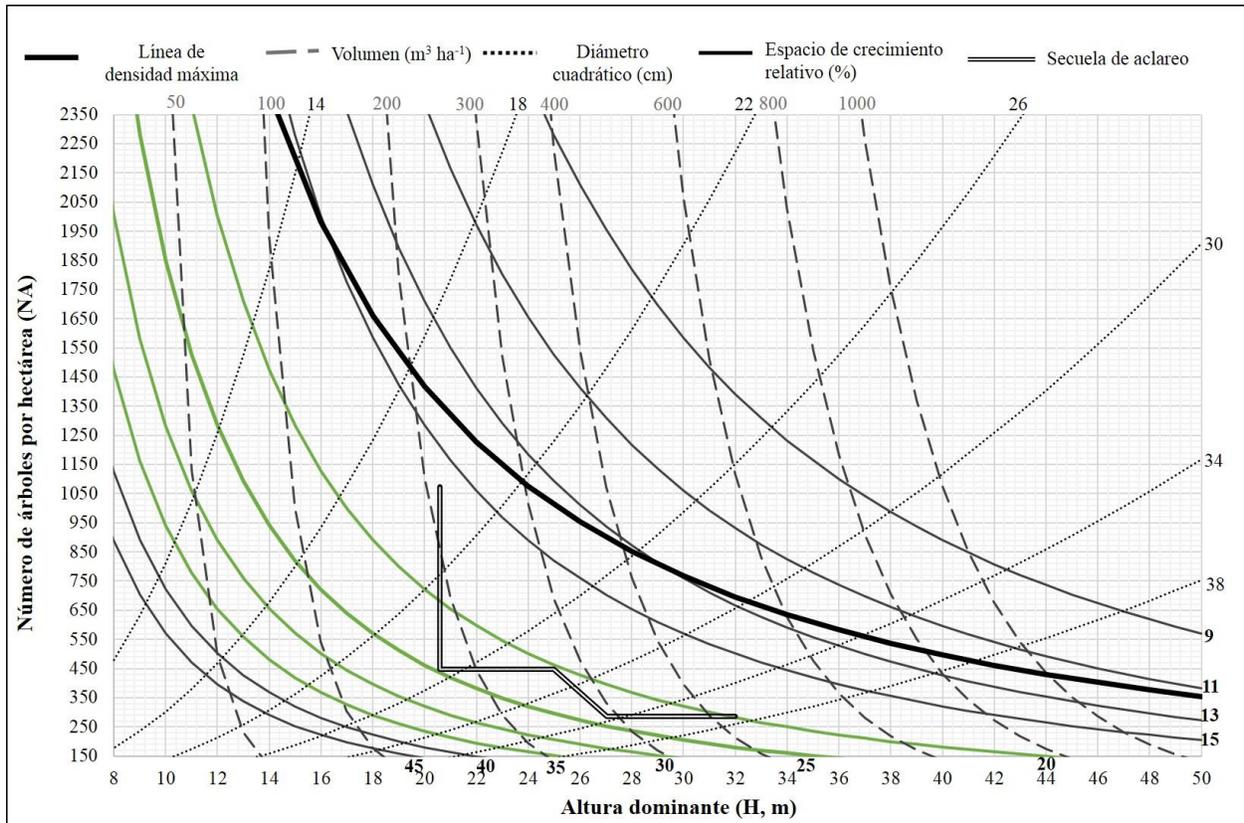


Figura 16. Secuela de aclareos de un rodal mixto de San Pedro el Alto, cuyo objetivo es mantener solo especies de *Pinus* para la cosecha final, y manejándolo en la zona de crecimiento constante.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES

El ajuste de las relaciones funcionales de tamaño promedio-densidad de los modelos de Reineke y Yoda con el enfoque de regresión de frontera estocástica en las formas exponencial (E), semi-normal (SN) y normal-truncada (NT), sugiere que se debe hacer una selección de sitios con mayor densidad, ya que al considerar la información de todos los sitios disponibles se sobreestimó la línea de densidad máxima. Por otro lado, al utilizar el 20 % de los sitios de mayor densidad con RFE en las formas E y SN, la línea de densidad máxima obtenida fue muy similar con el método de mínimos cuadrados ordinarios; no así con RFE en la forma NT que aunque presentó mejoras en el ajuste de los parámetros, la sobreestimación de la línea de densidad máxima fue evidente.

Al utilizar el modelo de Reineke ajustado con las proporciones de especies mediante mínimos cuadrados ordinarios, no fue posible usar las estimaciones para definir la línea de densidad máxima. Sin embargo, este ajuste proporcionó información valiosa respecto a las necesidades de luz requeridas para cada una de las especies, aspecto fundamental a considerar al momento de planear los aclareos.

El espaciamiento relativo es un indicador que permite establecer la densidad en cada etapa de crecimiento del rodal basado en la altura dominante promedio, indicador de la productividad y de la composición de especies; la inclusión del diámetro cuadrático y volumen promedio en el DMD permite planear intervenciones silvícolas adecuado e informado, basados en el cumplimiento de los objetivos, como las dimensiones de

madera que se demanda en el mercado, la composición de las especies deseadas, entre otros.

Los DMDs contruidos permiten manejar rodales mezclados y con diferentes objetivos de manejo. En el tiempo son una herramienta que debe de facilitar la toma de decisiones respecto a qué tratamientos aplicar al rodal para conducirlo al rodal meta. Uno de los problemas más frecuentes de los servicios técnicos en esta parte de México es justificar los tratamientos silvícolas a aplicar. En este caso el presente estudio arroja resultados importantes sobre el tipo e intensidad de los aclareos.

Sin lugar a dudas este tipo de estudio se enriquecerá cuando se cuente con datos de sitios con remediciones donde la mortalidad por ocupación de espacio pueda ser evaluada en el tiempo. Este tipo de estudios también permitirán estimar la velocidad con la cual las diferentes especies ocupan el espacio de crecimiento a fin de realizar no solo intervenciones adecuadas en términos de densidad, sino además oportunas.