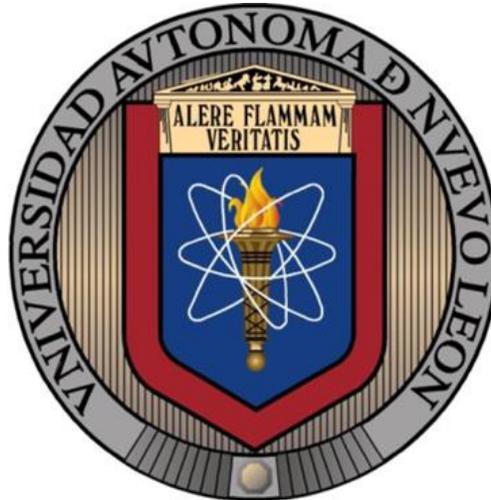


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**TESIS**

**DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA BOSQUES NATURALES  
EN "R Project", COMO HERRAMIENTA DE DECISIÓN EN EL  
MANEJO FORESTAL**

**POR**

**ING. FÁTIMA DEL CARMEN ACEVEDO BENÍTEZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

**NOVIEMBRE, 2017**

**DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA BOSQUES  
NATURALES EN “R Project”, COMO HERRAMIENTA DE  
DECISIÓN EN EL MANEJO FORESTAL.**

Aprobación de Tesis



---

Director: Dr. Marco Aurelio González Tagle



---

Codirector: Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón



---

Asesor: Dr. Javier Jiménez Pérez



---

Asesor Externo: Dr. César Pérez Cruzado

Noviembre, 2017

## DECLARATORIA

Declaro que la presente investigación es original y se desarrolló para obtener el título de Maestría en Ciencias Forestales. Donde se utilizó información de otros autores, a los cuáles se les otorga los créditos correspondientes.



---

Ing. Fátima del Carmen Acevedo Benítez

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT), por el financiamiento para la realización de mis estudios y del presente trabajo.

Gracias a la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por brindarme el conocimiento a través de todos los catedráticos que laboran en ella, así como al personal administrativo por el apoyo en todo trámite necesario.

Agradezco la asesoría y disponibilidad para la realización del presente trabajo, además de su amistad y confianza dada por el Dr. Marco Aurelio González Tagle, director de mi tesis de Maestría para en un futuro cercano continuar trabajando en los proyectos que vengan.

Agradezco también a mis asesores por el conocimiento compartido y apoyo en la trayectoria escolar Dr. Javier Jiménez Pérez y Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón.

Gracias también por el invaluable apoyo y conocimiento durante la estancia como investigadora visitante del Dr. César Pérez Cruzado de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Santiago de Compostela, España.

Agradezco al M.C. José Encarnación Luján Soto, jefe de la UMAFOR 1008, El Salto por su apreciable ayuda en la obtención de los datos, así como al personal laboral de la institución.

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo y agradezco infinitamente a Dios por darme la dicha de ser mujer y estar aquí permitiéndome esforzarme cada día con salud y bienestar al lado de mi familia y amigos.

Dedico y agradezco a mis Padres por el inigualable apoyo que me han brindado a lo largo de mi formación educativa, y porque gracias a la inspiración de ellos estoy en este punto tan importante de mi vida.

Dedico mi trabajo y esfuerzo también a mis hermanos: Erick, Nadia y Anahí, así como a mis cuñados: Omar y Elizabeth y por supuesto a mis hermosos sobrinos: Sebastian, Ximena, Isabella, Jorge, Emiliano, Saúl y a mi sobrino político, Darien que a pesar de todo me apoyan siempre en todo momento, con sus consejos y me brindan su amor incondicional, porque la familia es primero.

Agradezco con todo mi cariño a mis AMIGOS, personas que de verdad están ahí para apoyarnos en todo momento, en ratos de estrés, de presión, pero también de diversión, **Anali y Edgar**, quien me han demostrado que la amistad sincera de verdad existe bajo ningún interés gracias colegas.

Gracias también a personas que fueron importantes en el transcurso de esta etapa de mi vida, personas que sé que en cualquier momento estarán ahí para ayudar en lo que se ofrezca, **Diana, Richy, Angy, Rigo, René**, además de catedráticos que dejan de lado sus títulos para brindarnos su amistad, **Dr. Fortunato, Dr. Humberto**.

Dedico finalmente y con todo mi amor a quien me ha apoyado y ha estado a mi lado pase lo que pase desde 2011, la persona que me acompañará el resto de mis días y en quien encuentro paz, tranquilidad, aventura, diversión, cariño, confianza, con quien he pasado increíbles momentos que no cambiaría por nada, con quien he comenzado a recorrer el mundo, con todo mi amor, **Edgar Jesús Ortega Arroyo**

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. ANTECEDENTES .....	2
2.1. Antecedentes del Manejo Forestal en México .....	2
2.2. Marco de Referencia.....	3
2.2.1. Densidad.....	3
2.2.2. Índices de densidad .....	3
2.2.3. Índice de Espaciamento de Hart-Becking .....	4
2.2.4. Diagrama de Manejo de Densidad .....	4
2.2.5. Software R Project .....	4
2.2.6. Plataforma de Git Hub .....	5
3. HIPÓTESIS .....	7
4. OBJETIVOS.....	7
4.1. Objetivo General.....	7
4.2. Objetivos Específicos.....	7
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
5.1. Área de Estudio .....	8
5.2. Ejido Pueblo Nuevo.....	8
5.3. Origen de los datos .....	9
5.4. Estimaciones para cada árbol .....	10
5.4.1. Parámetros dasométricos .....	11
6. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA RODALES NATURALES. ....	13
6.1. Ajuste de las ecuaciones.....	14
6.2. Representación gráfica de las isólineas de un DMD .....	15
7. RESULTADOS.....	16
7.1. Datos de rodal y ajuste de los modelos .....	16
7.2. Parámetros de ajuste de los modelos.....	17
7.3. Diagrama de Manejo de Densidad desarrollado para el Ejido Pueblo Nuevo, Durango .....	18



7.4. Diagrama de Manejo de Densidad, de Volumen Comercial.....	20
7.5. Guía paso a paso para desarrollar un DMD en “R Project” .....	23
8. DISCUSIÓN .....	34
9. CONCLUSIÓN .....	35
10. BIBLIOGRAFÍA .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Representatividad de géneros presentes.....	10
Tabla 2. Parámetros estimados diámetro medio cuadrático .....	17
Tabla 3 parámetros estimados Volumen .....	17
Tabla 4. Estadística descriptiva de los sitios de muestreo, considerando todas las dimensiones del inventario .....	19
Tabla 5. Parámetros estimados del diámetro medio cuadrático considerando las dimensiones del volumen comercial .....	21
Tabla 6. Parámetros estimados del volumen considerando las dimensiones de volumen comercial del rodal .....	21
Tabla 7. Estadística descriptiva de los sitios con dimensiones en volumen comercial .....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Área de estudio Ejido Pueblo Nuevo .....	9
Fig. 2 Gráfico de dispersión del rodal .....	17
Fig. 3 Diagrama de Manejo de Densidad desarrollado para el Ejido Pueblo Nuevo, Durango. Considerando todas las dimensiones de los árboles presentes en las parcelas de muestreo .....	19
Fig. 4. Gráfico de dispersión de los sitios seleccionados para la elaboración de un DMD, incluyendo sólo el volumen comercial.....	20
Fig. 5 Diagrama de Manejo de Densidad, con énfasis en las dimensiones de Volumen comercial .....	22

## RESÚMEN

El manejo de la densidad en un bosque es uno de los elementos principales, para el desarrollo silvícola. El presente trabajo, muestra la construcción de un Diagrama de Manejo de Densidad el cual facilita la toma de decisiones para los manejadores de un predio bajo manejo forestal. Los datos provienen del inventario forestal del Ejido Pueblo Nuevo, proporcionados por la UMAFOR 1008, El Salto, Durango, con un total de 196 sitios de muestreo de los cuales fueron medidas las variables dasométricas de estado: número de árboles por hectárea  $N$ , altura dominante  $H_0$ , diámetro medio cuadrático  $dg$  y volumen  $V$ .

El Diagrama se desarrolló con dos ecuaciones base, representando el diámetro medio cuadrático  $dg$  y el Volumen  $V$ , y el Índice de espaciamiento de Hart, con el fin de ser usado como referencia en la planeación de cortas, las ecuaciones base fueron ajustadas a través de la regresión no lineal en el software estadístico “R project”, a través de un proceso iterativo, esperando una convergencia positiva, el ajuste simultáneo de las ecuaciones se realizó por el método de FIML, en el software estadístico SAS obteniendo un  $R^2$ : **0.7074** , RMSE: **2.7563** para la ecuación de  $dg$  y  $R^2$ : **0.9947**, RMSE: **7.9114** para el Volumen. Los valores en las isóneas del Índice de Hart adquirieron valores mínimos de 16 y máximo de 56.

El procesamiento de los datos se realizó, en conjunto con la plataforma en línea de GitHub, donde se implementó el uso de las diferentes tecnologías de la información para lograr el principal objetivo que es desarrollar una guía bajo el lenguaje de Rmarkdown, para su replicabilidad automática y después ser publicada en la unión europea de Zenodo.

## ABSTRACT

The management of density in a forest is one of the main elements for forestry development. The present work shows the construction of a Density Management Diagram which facilitates the decision making for the managers of a land under forest management. The data come from the forest inventory of Ejido Pueblo Nuevo, provided by UMAFOR 1008, El Salto, Durango, with a total of 196 sampling sites of which the state variables were measured: number of trees per hectare  $N$ , dominant height  $H_0$ , mean square diameter  $d_g$  and volume  $V$ .

The Diagram was developed with two base equations, representing the mean square diameter  $d_g$  and Volume  $V$ , and the Hart spacing index, in order to be used as a reference in the short planning, the base equations were adjusted through The non-linear regression in the statistical software "R project", through an iterative process, expecting a positive convergence, the simultaneous adjustment of the equations was performed by the FIML method, in the statistical software SAS obtaining a  $R^2$ : 0.7074, RMSE: 2.7563 for the equation of  $d_g$  and  $R^2$ : 0.9947, RMSE: 7.9114 for Volume. The representation of the isolines of Hart index acquired minimum values of 16 and maximum of 56.

The data processing was done, together with the online platform of GitHub, where the use of different information technologies was implemented to achieve the main objective of developing a guide under the language of Rmarkdown, for its automatic replicability. And then published in the European Union of Zenodo

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la ocupación del arbolado en un tiempo y lugar determinado, la densidad es un confiable indicador y de manera clara y objetiva representa la estructura de las áreas forestales de mayor interés (Hernández Ramos et al., 2013), el manejo de la densidad es el principal objetivo de los silvicultores para lograr una condición deseable en el bosque, un Diagrama de manejo de Densidad (DMD) es uno de los métodos más eficaces de diseño, visualización y evaluación de los regímenes alternativos en el manejo de la densidad de masas (Barrio Anta & Álvarez González, 2005). Los diagramas de manejo de la densidad constituyen una herramienta valiosa para la planeación de tratamientos silvícolas que garanticen una óptima ocupación del sitio de acuerdo con los objetivos de producción propuestos para éste.

La utilidad de los DMD radica en la representación gráfica de forma rápida y sencilla de la evolución de la masa forestal y con ello la comparación entre las diferentes alternativas silvícolas, considerando los diferentes objetivos del rodal haciéndolo así uno de los métodos más efectivos en la representación de la densidad de las masas forestales (Castedo-Dorado *et al.*, 2007).

La necesidad de conocer el estado de desarrollo de un rodal para su cosecha y aprovechamiento sostenible, así como la respuesta a las prácticas silvícolas ha sido uno de los principales objetivos de la investigación forestal. En este sentido las Tecnologías de la información son herramientas muy valiosas para los investigadores, pero también lo son y de manera fundamental para los manejadores forestales. El desarrollo de las nuevas tecnologías de la información dentro del Manejo Forestal permite al usuario final mejorar las técnicas de aplicación en el área de su interés.

La divulgación científica a través de las plataformas en internet, permiten al usuario final obtener la mejor información para lograr sus intereses, una de las plataformas que se utilizan para divulgar aspectos científicos, es GitHub es un sitio social exitoso, que permite el alojamiento de repositorios en una versión de

control Git. GitHub es un ejemplo de un espacio de trabajo basado en el conocimiento, desarrollo y divulgación científica, donde se integran la información y los usuarios combinando sus actividades de investigación con el fin de lograr los objetivos de trabajo (Dabish, Stuart, Tsay, & Herbsleb, 2012)

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Antecedentes del Manejo Forestal en México

El aprovechamiento de los recursos que ofrece el bosque de una manera ordenada, procurando la satisfacción de las necesidades que demanda la sociedad actual, sin comprometer, las necesidades de bienes y servicios de las generaciones futuras, comprenden el manejo forestal sostenible en México (Aguirre-Calderón, 2015). Más sin embargo hablar del manejo forestal sostenible, engloba una serie de elementos de gran importancia sin escala alguna, incluyendo en ello factores sociales, económicos y ecológicos.

A lo largo de su historia, México como un país independiente, ha enfrentado diversos cambios, mismos que ha enfrentado y lo han conducido hacia un Manejo Forestal Sustentable Comunitario (Trujillo Bautista, 2009).

Así en la década de 1970 a través de una serie de reformas y descontentos entre los campesinos, se empiezan a utilizar diversos tratamientos silvícolas en un mismo predio, utilizando principalmente métodos como “regeneración con árboles padre”, cortas de liberación y aclareos. Este manejo “científico” fue la estrategia co-fundadora de lo que hoy en día se conoce como Manejo Forestal Sustentable, orientado a la conservación de los bosques. Entonces en los años ochenta, inicia el auge del movimiento de las comunidades forestales, dando paso a la “Forestería” (silvicultura), con un objetivo primordial que era garantizar el abastecimiento de material prima forestal para la industria nacional, (FAO, 2004).

## 2.2. Marco de Referencia

### 2.2.1. Densidad

Conceptualmente el manejo de la densidad permite el control del desarrollo de un bosque, competencia y regulación forestal con el fin de alcanzar los objetivos específicos de manejo forestal. La determinación de los niveles apropiados de densidad envuelven una serie de procesos biológicos, tecnológicos y factores económicos de acuerdo a la situación de manejo del rodal, (Castedo-Dorado, *et al.*, 2009). A partir de este esquema, la vinculación de las funciones que nos permiten planificar y describir cuantitativamente las interrelaciones entre producción, densidad y mortalidad en las diferentes etapas de desarrollo que presenta el rodal (Chauchard & Olalde, 2004), es posible la creación de DMD y establecer criterios sobre el logro de determinados objetivos de producción.

### 2.2.2. Índices de densidad

Los investigadores forestales han desarrollado medidas de densidad con el fin de describir el grado de aglutinamiento de un rodal en relación con una condición de densidad. Estas medidas se han utilizado para la regulación forestal en condiciones de competencia dentro de un rodal, planeación de tratamientos silvícolas, o para predecir el crecimiento y rendimiento del bosque, (Torres-Rojo & Velázquez-Martínez, 2000), los llamados índices de densidad e índices de competencia, cuya diferencia entre ambos corresponde a el tipo de grupos que engloba siendo así que los índices de densidad engloban el nivel de rodal y los índices de competencia hacen referencia a nivel de árbol individual han sido desarrollados y de acuerdo al objetivo final éstos determinan el espaciamiento disponible independiente de la edad o la calidad de sitio (Bravo, *et al.* 1997).

Éstos Índices de densidad del rodal son utilizados en esencia para caracterizar estados de desarrollo como los de crecimiento libre, crecimiento con competencia y mortalidad debido a la competencia (Penner, *et al.*, 2006)

### 2.2.3. Índice de Espaciamento de Hart-Becking

Este índice desarrollado por Hart (1928) y Becking (1953), es definido como la relación entre la distancia de los individuos y la altura dominante de una masa forestal, considerando de manera especial la distribución real que tienen los individuos en el bosque (Bravo et al., 1997)

El Índice de Hart-Becking se define como la razón expresada en porcentaje, entre la distancia media de los árboles del rodal y su altura dominante, asumiendo la distancia media dependiendo de la distribución de los individuos en el terreno. El índice de Hart-Becking es utilizado para la caracterización de la densidad por ser independiente de la calidad de sitio y de la edad y porque la altura dominante como parte de la composición del mismo determina los esquemas de corta desde un punto biológico (Diéguez A. et al., 2009).

### 2.2.4. Diagrama de Manejo de Densidad

Un Diagrama de Manejo de Densidad, permite al manejador determinar los esquemas de cortas y particularmente son utilizados en la toma de decisiones, (Newton, 1997). Un Diagrama de Manejo de Densidad permite realizar una inspección gráfica del desarrollo natural del rodal a través del tiempo, teniendo como ventaja principal la independencia ante la edad y la calidad de sitio del mismo siendo aplicable ante una alta gama de condiciones en el manejo forestal (Dean & Clark Baldwin, 1993). Estructuralmente un DMD es presentado en una gráfica dimensional con relaciones cuantitativas que son superpuestas (Newton, 2003) , y permite la toma de decisiones de manejo forestal dentro de un rodal.

### 2.2.5. Software R Project

**R** es un software de programación cuyo lenguaje es de alto nivel y proporciona un entorno para el análisis de datos y gráficos más potente y profesional que existe en el que es posible realizar tareas estadísticas de todo tipo, desde las más elementales hasta las más avanzadas (González Tagle, 2015).

La integración de este software entre otras ventajas ofrece:

- Facilidad de almacenamiento y manejo de datos
- Una gran colección integrada de herramientas para el análisis de datos
- Posibilidades gráficas para el análisis de datos.
- Un amplio lenguaje de programación bien desarrollado simple y efectivo, con posibilidades de replicabilidad para próximos análisis.

R es por mucho un vehículo para el desarrollo de nuevos métodos de análisis de datos interactivos. Tiene un desarrollo rápido, y ha sido extendido ampliamente por una gran colección de paquetes lo que permite imprimir la esencia de cada trabajo en una forma individual (Venables, Smith, & R Core Team, 2017).

## **R Studio**

Como complemento RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R. Es software libre con licencia GPLv3 y se puede ejecutar sobre distintas plataformas (Windows, Mac, or Linux) o incluso desde la web usando RStudio Server, (Urcera, 2012) y permite al usuario crear diferentes archivos, uno de los más usados e importantes son los scripts que permiten al usuario visualizar la información procesada durante el desarrollo de la programación con diferentes opciones de edición.

### **2.2.6. Plataforma de Git Hub**

GitHub es una plataforma en línea que permite el control y colaboración de proyectos y repositorios, permite al usuario realizar consultas y trabajar en conjunto en el desarrollo de proyectos en cualquier parte del mundo sin necesidad presencial (GitHub, 2016).

En la actualidad el uso de las Tecnologías de la información facilita al usuario final la búsqueda de información en los proyectos de investigación

GitHub es mucho más que un servicio de alojamiento de código. Además de éste, se ofrecen varias herramientas útiles para el trabajo en equipo. Entre ellas, cabe destacar:

- Una “wiki” para el mantenimiento de las distintas versiones de las páginas.
- Un sistema de seguimiento de problemas que permiten a los miembros de tu equipo detallar un problema con tu software o una sugerencia que deseen hacer.
- Una herramienta de revisión de código, donde se pueden añadir anotaciones en cualquier punto de un fichero y debatir sobre determinados cambios realizados en un “commit” específico.
- Un visor de ramas donde se pueden comparar los progresos realizados en las distintas ramas de nuestro repositorio (Castillo, 2012).

### 3. HIPÓTESIS

La representación gráfica de un Diagrama de Manejo de Densidad, puede ser desarrollada por investigadores y prestadores de servicios técnicos en áreas susceptibles al manejo forestal, mediante el uso de tecnologías de la información.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. Objetivo General

Desarrollar un Diagrama de Manejo de Densidad, basado en el Índice de Espaciamiento de Hart-Becking (IH) mediante la creación de una guía con rutinas empleando el software estadístico “R Project”, de tal manera que se pueda emplear en la toma de decisiones en el Manejo Forestal.

#### 4.2. Objetivos Específicos

- Construcción de un Diagrama de Manejo de Densidad para el manejo de Bosques Naturales con la finalidad de emplearlo en la toma de decisiones de manejo forestal.
- Establecer los niveles de densidad de referencia para apoyar la planeación de cortas.
- Describir a detalle la metodología para la generación de Diagramas de Manejo de Densidad, mediante una guía que contenga las rutinas en “R Project” para fomentar repetición y aplicación a futuro en áreas susceptibles al Manejo Forestal.
- A través del uso de las tecnologías de la información, difundir el proyecto de manera pública, en la plataforma de GitHub y Zenodo.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Área de Estudio

El desarrollo de éste proyecto tiene como finalidad principal la divulgación científica y tecnológica para la toma de decisiones silvícolas en el manejo de bosques naturales, y para desarrollar el DMD es necesaria la información dasométrica de inventario forestal, para este caso se eligió el Ejido de Pueblo Nuevo, Durango.

### 5.2. Ejido Pueblo Nuevo

De acuerdo a la CONAFOR (2014), en su manual de Comunidades instructoras, describe al Ejido de Pueblo Nuevo acentuando su trayectoria forestal.

**Manejo Forestal:** El Ejido Pueblo Nuevo posee una superficie de 237,947 Ha (Fig. 1). Que beneficia a 1507 ejidatarios, tiene una posibilidad de aprovechamiento maderable de 85,000 metros cúbicos RTA cuenta con sus propios servicios técnicos forestales encargados de ejecutar el programa de manejo forestal autorizado, cuenta con personal capacitado para realizar las actividades de aprovechamiento forestal y cuenta con un certificado por el buen manejo forestal en una superficie de 84,947 Ha. También existen sitios establecidos en áreas de conservación para medir impactos ambientales por efectos del aprovechamiento forestal, además de un manual de medidas de mitigación y prevención de los impactos durante las distintas etapas de manejo forestal por ultimo este ejido tiene un vivero forestal donde produce 145,000 plantas que son utilizadas en sus propias actividades de reforestación y cortas de regeneración, para todas estas actividades cuentan con personal profesional y técnicos prácticos capacitado para transmitir sus experiencias y conocimientos.

**Certificación:** La CONAFOR reconoce los certificados que el Ejido adquirió: - 2001 Premio al Mérito Nacional Forestal. -2011 Certificado al Buen Manejo Forestal FSC (Smart Wood por la empresa internacional “Rainforest” con el código de certificación SW-FM/COC-000132 (Fuente: CONAFOR, 2014).

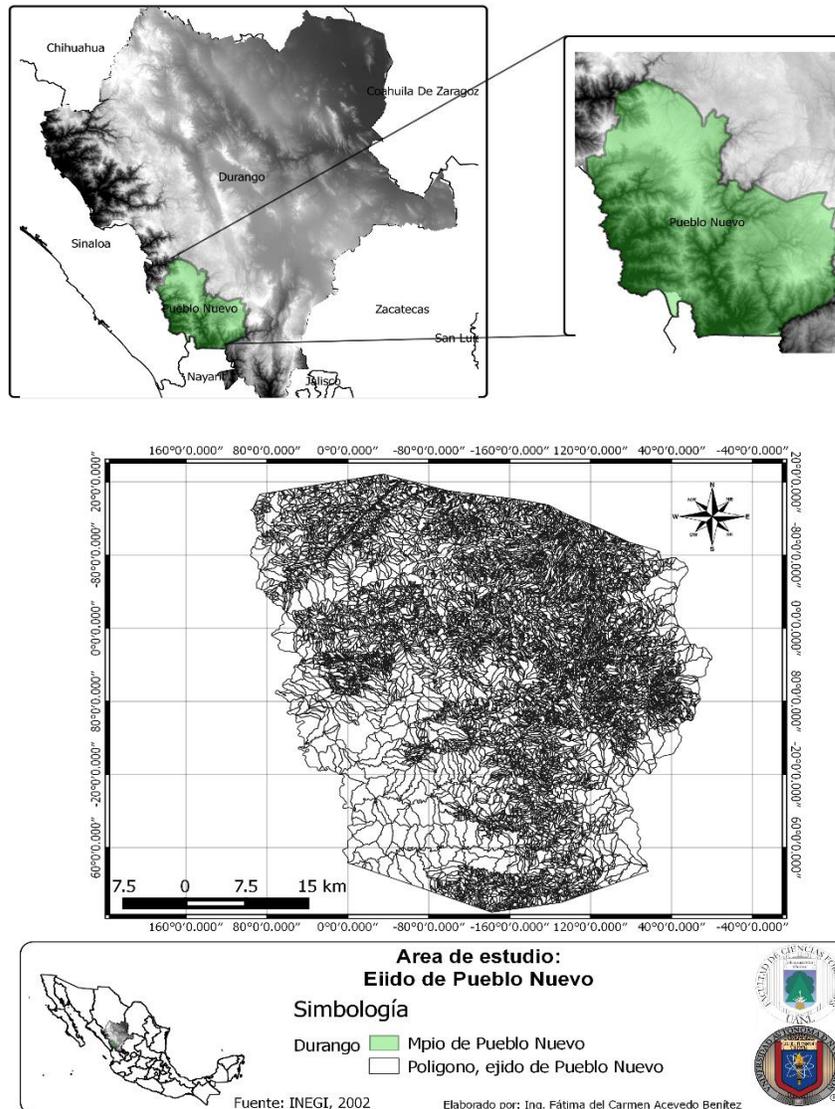


Fig. 1 Área de estudio Ejido Pueblo Nuevo

### 5.3. Origen de los datos

Los datos utilizados para el desarrollo del Diagrama de Manejo de Densidad, provienen del inventario forestal, proporcionados directamente por la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1008 El Salto, Durango. Corresponden a 196 parcelas, ubicadas en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango, México. De acuerdo a

Castedo-Dorado, *et al.*(2007), se trata de cubrir la máxima densidad existente en masas puras y regulares del género *Pinus*.

Para cada parcela seleccionada se estimaron las siguientes variables dasométricas: Número de árboles por hectárea (N), diámetro medio (DN) y altura media (H), diámetro medio cuadrático (dg), altura dominante (H0), área basal (G), volumen (V) e índice de Hart-Becking (IH).

Las masas de bosque natural perteneciente al Ejido Pueblo Nuevo son masas forestales mixtas de Pino-Encino, sin embargo para el presente estudio sólo se tomaron en cuenta los datos correspondientes a las especies del género *Pinus* presente en las áreas de inventario, obteniendo mediciones en cada uno de los individuos de altura (h) y diámetro en cm (dn) a la altura de 1.30 m, mismos que van desde 7.5 cm hasta 45 cm (diámetro de manejo silvícola en el ejido) y una densidad mínima de 100 árboles por hectárea en parcelas con un radio de 17.84 m, es decir un área de 1,000 m<sup>2</sup>, tomando en cuenta que la proporción del género *Pinus* cubre el 90% de la superficie de los sitios de muestreo para la elaboración de un Diagrama de Manejo de Densidad.

Las especies presentes en los sitios son *Pinus cooperi*, *P. duranguensis*, *P. leiophylla*, *P. ayacahuite*, *P. teocote*, *Quercus sideroxyla*, *Arbutus spp.*, *A. xalapensis*. Con una representatividad tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Representatividad de géneros presentes

Género	% Ocupación
<i>Pinus</i>	91.2
<i>Quercus</i>	7.3
<i>Arbutus</i> otros	1.5

#### 5.4. Estimaciones para cada árbol

Con el fin de obtener los datos dasométricos necesarios para el desarrollo gráfico del DMD, es necesario realizar la estimación de variables dasométricas individuales y de masa de la siguiente manera:

**Cálculo de área basal y volumen:** para complementar los datos es necesario la estimación del área basal individual ( $g_i$ ) y volumen (VTA), empleando las siguientes fórmulas:

$$g_i = \frac{\pi}{4} (dn/100)^2$$

Dónde:  $g_i$ = área basal individual ( $m^2$ ),  $dn$ = diámetro normal.

$$VTA = \beta_0 + \beta_1 * (dn^2 * h)$$

Dónde: VTA = Volumen total de un árbol con corteza ( $m^3$ ),  $\beta_0$ = parámetro estimado (0.00509),  $\beta_1$ = Parámetro estimado (0.0000412)  $dn$ = Diámetro normal (cm),  $H$ = altura total (m).

#### 5.4.1. Parámetros dasométricos

Para cada parcela se calculan los siguientes parámetros dasométricos:

*Número de árboles por hectárea* [5-1]

$$N = \sum n * 10$$

Dónde:  $N$ = Número de árboles por hectárea,  $n$ = árboles que están presentes en el sitio de muestreo.

*Diámetro medio* [5-2]

$$DN = \frac{\sum dn}{n}$$

Dónde:  $DN$ = Diámetro medio por parcela,  $dn$ = diámetro normal individual.

*Altura media* [5-3]

$$H = \frac{\sum h}{n}$$

Dónde: H= Altura media por parcela, h= altura individual.

*Área basal*

[5-4]

$$G = \sum gi * 10$$

*Volumen*

[5-5]

$$V = \sum VTA * 10$$

Dónde: G corresponde a la sumatoria de las áreas basales individuales de todos los individuos de la parcela muestreada y V es la sumatoria del VTA individual por sitio, extrapolados para su representación por hectárea.

*Diámetro medio cuadrático*

El diámetro medio cuadrático constituye una variable que representa el diámetro equivalente al árbol de área basal media y el número de árboles por hectárea.

Diámetro del árbol de área basal media del rodal

[5-6]

$$dg = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

*Altura dominante*

Definida por Assman (1970) como la altura promedio de los 100 árboles de mayor diámetro por hectárea.

[5-7]

$$H0 = \frac{\sum Hdmax}{100}$$

*Índice de Hart-Becking*

El índice de Hart-Becking es conocido como el coeficiente de espaciamiento en masas regulares se define como la relación entre el espaciamiento medio del arbolado y su altura dominante ( $H_0$ ), expresado en tanto por cien, la distancia media entre árboles depende de la distribución teórica de éstos en el terreno que se asuma (Diéguez A. *et al.*, 2009) según la fórmula siguiente:

[5-8]

$$IH = K * \frac{100}{\sqrt{N}} * H_0$$

Dónde: IH= Índice de Hart-Becking expresado en por ciento (%), K= Constante  $(4/3)^{0.25}$  suponiendo una distribución natural a tres bolillo de los individuos en el bosque, o 1 si la distribución de los árboles en el terreno asume una malla cuadrada (plantaciones forestales) N= número de árboles por hectárea y  $H_0$ =la altura dominante por parcela.

## 6. METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN DIAGRAMA DE MANEJO DE DENSIDAD PARA RODALES NATURALES.

Siguiendo la metodología propuesta por Barrio Anta & Álvarez González, (2005) y Pérez-Cruzado, *et al.* (2009), la construcción de un diagrama de manejo de densidad se realiza bajo los siguientes pasos:

1. Representación gráfica del número de árboles por hectárea (N) en el eje de las ordenadas y la altura dominante ( $H_0$ ) en el eje de las abscisas.
2. Índice de caracterización de espesura elegido, en este caso de estudio se elige el Índice de Hart-Becking.
3. Un sistema de dos ecuaciones no lineales.

La primera ecuación propuesta permite predecir el diámetro medio cuadrático ( $d_g$ ), a partir del número de árboles por hectárea y la altura dominante. Esta ecuación está basada en la relación que existe entre el tamaño medio de los árboles, la densidad y un indicador de la productividad.

[6-1]

$$dg = \beta_0 * N^{\beta_1} * H0^{\beta_2}$$

La segunda ecuación estima la productividad del rodal expresada como la relación existente entre el volumen de masa con el volumen de un árbol representativo (dado por el producto del diámetro medio cuadrático y la altura dominante) y el número de pies por hectárea.

[6-2]

$$V = \beta_3 * dg^{\beta_4} * H0^{\beta_5} * N^{\beta_6}$$

### 6.1. Ajuste de las ecuaciones

El DMD a desarrollar se construye a partir del empleo del Índice de Hart-Becking, y dos funciones base, modelos no lineales que a través de un proceso iterativo permite estimar los parámetros para realizar la representación del gráfico.

Al realizar como primer paso el ajuste simultáneo de las ecuaciones base [6-1] y [6-2],  $N$  y  $H0$  funcionan como variables exógenas (sus valores son determinados de forma completamente independiente al sistema);  $V$  es una función endógena (depende de otras variables, el modelo intenta explicar) y  $dg$  es una variable endógena instrumental (aparece en ambos lados de la igualdad), debido a la correlación entre los componentes del sistema (Pérez-Cruzado et al., 2009).

El ajuste de los modelos descritos se realiza en el software estadístico R Project 3.4.0. Rstudio 1.0.143, utilizando la función *nls*, que permite realizar el proceso iterativo agregando valores de partida inicial y estimando los valores estimados de  $\beta_0 \dots \beta_6$ , con base en una convergencia positiva del proceso.

El ajuste de los modelos no lineales no proporciona el valor del coeficiente de determinación pseudo  $R^2$  (comparación entre los valores predichos contra los valores estimados), cabe mencionar que se utilizará este valor en lugar del valor de  $R^2$ , ya que este valor aplica un mejor valor de ajuste en modelos no lineales,

y el RMSE cuadrado medio del error por sus siglas en inglés, ya que estos estadísticos de bondad de ajuste tienen sentido para modelos no lineales.

A efectos de conocer el porcentaje de variabilidad del diámetro medio cuadrático y del Volumen que se explica en los modelos alométricos no lineales, es necesario realizar el cálculo a través de funciones especiales creadas con el fin de obtener los valores requeridos y aceptar el ajuste de los modelos. Los parámetros obtenidos fueron significativos a un nivel de probabilidad de 95%.

### **Ajuste simultáneo de las ecuaciones**

Debido que el  $dg$  aparece como una variable instrumental en las dos ecuaciones base, es necesario un ajuste simultáneo de las ecuaciones no lineales, éste se realizó mediante el procedimiento de FIML mediante el software SAS.

## **6.2. Representación gráfica de las isolíneas de un DMD**

Una vez estimados los parámetros de las ecuaciones [6-1] y [6-2] es posible obtener las expresiones que permiten representar de manera gráfica los valores para el Índice de Hart-Becking  $IH$ , el diámetro medio cuadrático  $dg$ , y el volumen del rodal  $V$ .

1. En primer lugar se expresa el nivel de espesura de la masa mediante el Índice de Hart-Becking. La representación de las isolíneas se obtienen del despejando  $N$  de la ecuación [5-8].

[6-3]

$$N = k * \left( \frac{100 * 100}{IH * H0} \right)^2$$

2. La representación de las isolíneas del diámetro medio cuadrático se representan por medio de la ecuación [6-1] y fijando a  $dg$  como una

constante, se realiza el despeje de  $N$  y dando valores a la altura dominante  $H_0$  para cada valor del diámetro medio cuadrático.

[6-4]

$$N = \left( \frac{dg}{\beta_0 * H_0^{\beta_2}} \right)^{1/\beta_1}$$

3. Las isolíneas para la representación del volumen en el gráfico se obtienen despejando el número de árboles por hectárea  $N$  de la ecuación [6-2] y dando valores de altura dominante para cada valor de Volumen  $V$ .

[6-5]

$$N = \left( \frac{V}{\beta_3 * \beta_0^{\beta_4} * H_0^{\beta_2 * \beta_4 + \beta_5}} \right)^{1/\beta_1 * \beta_4 + \beta_6}$$

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Datos de rodal y ajuste de los modelos

La distribución de los datos dominando una distribución normal para el ajuste de los modelos de densidad se muestra en la Fig. 2, con un diámetro medio cuadrático que va en un rango de 11.5 - 45.5 cm y una altura dominante que va de los 7.3 a los 25.2 metros.

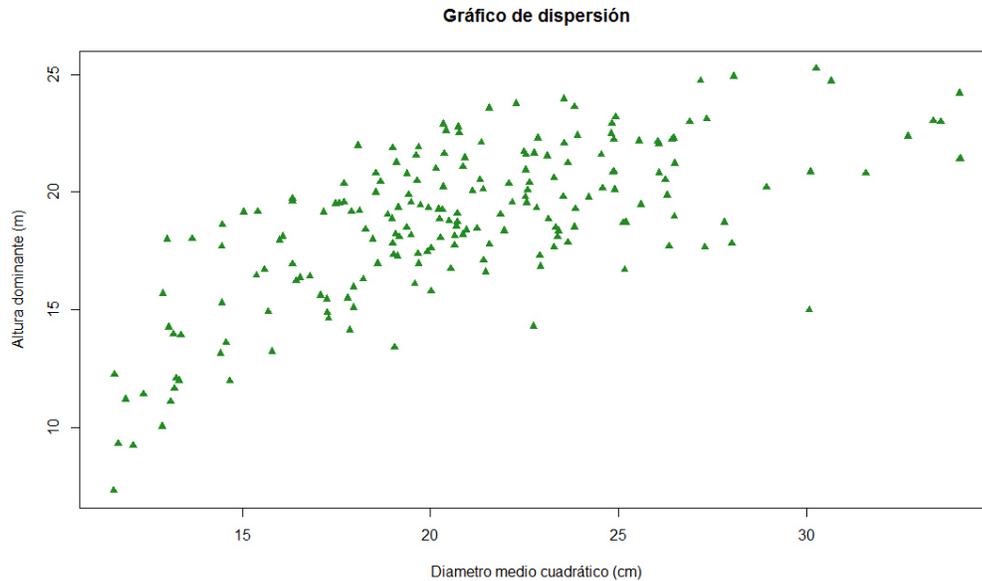


Fig. 2 Gráfico de dispersión del rodal

## 7.2. Parámetros de ajuste de los modelos

Los parámetros de ajuste de los modelos utilizados en el desarrollo del DMD se muestran a continuación, al realizar la inspección es posible afirmar que el ajuste de los mismos fue altamente significativo.

Tabla 2. Parámetros estimados diámetro medio cuadrático

$$dg = \beta_0 * N^{\beta_1} * H0^{\beta_2}$$

Parameters	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
B0	8.585482	2.0915	4.10	<0.0001 ***
B1	0.87124	0.0721	12.08	< 0.0001 ***
B2	-0.26779	0.0219	-12.23	< 0.0001 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.756 on 193 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 8

Tabla 3 parámetros estimados Volumen

$$V = \beta_3 * dg^{\beta_4} * H0^{\beta_5} * N^{\beta_6}$$

Parameters	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
B3	0.000061	6.622e-6	9.15	<0.0001 ***

---

B4	2.089923	0.0286	73.01	<0.0001 ***
B5	0.864783	0.0402	21.53	<0.0001 ***
B6	0.940937	5.456e-6	91.99	<0.0001 ***

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.795 on 192 degrees of freedom

Number of iterations to convergence: 5

---

$$dg = 8.585482 * N^{0.87124} * H0^{-0.26779}$$

Pseudo R<sup>2</sup>: **0.7074** RMSE: **2.7563**

$$V = 0.000061 * dg^{2.089923} * H0^{0.864783} * N^{0.940937}$$

Pseudo R<sup>2</sup>: **0.9947** RMSE: **7.9114**

### 7.3. Diagrama de Manejo de Densidad desarrollado para el Ejido Pueblo Nuevo, Durango

La representación gráfica de un Diagrama de Manejo de Densidad a continuación mostrado en la Fig. 3, muestra la superposición de los elementos claves para el manejo forestal de un rodal a través de isolíneas que permiten interpretar el comportamiento de una masa forestal, y que facilita la toma de decisiones en el desarrollo silvícola, tomando como primer opción el Índice de Espaciamiento de Hart-Becking como base para el planteamiento de cortas, ya que éste índice como se mencionó con anterioridad es independiente de la calidad de estación.

La forma de utilización del DMD permite realizar la planeación de distintos esquemas de corta que mejor se ajusten al desarrollo del rodal, teniendo en cuenta principalmente el estado de desarrollo inicial del rodal y el estado de desarrollo al que se pretende llevar en un futuro.

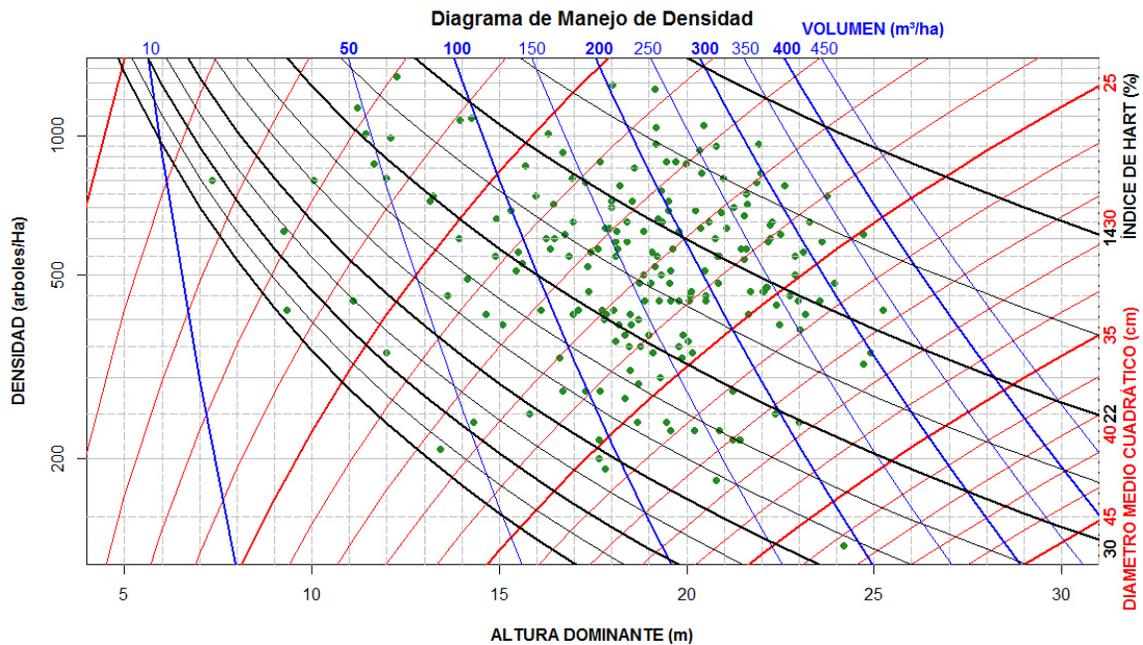


Fig. 3 Diagrama de Manejo de Densidad desarrollado para el Ejido Pueblo Nuevo, Durango. Considerando todas las dimensiones de los árboles presentes en las parcelas de muestreo

Los datos representados en el DMD, presentan los datos de las parcelas de inventario, tomando en cuenta todas las dimensiones de los sitios, oscilando las parcelas con un diámetro mínimo de 7.5 cm, hasta la dimensiones mayores del rodal con un diámetro medio de parcela de 45.24 cm, mismos que pueden ser inspeccionados en la Tabla 4.

La inspección de los estadísticos descriptivos de los sitios de muestreo se aprecia en la Tabla 4, datos que se tomaron en cuenta al desarrollar el DMD.

Tabla 4. Estadística descriptiva de los sitios de muestreo, considerando todas las dimensiones del inventario

Variable	Media	Máximo	Mínimo	SD
<b>N</b> (árboles.ha <sup>-1</sup> )	559.39	1340	130	230.82
<b>dg</b> (cm)	21.01	45.81	11.58	5.10
<b>G</b> (cm)	18.26	107.11	4.51	9.13
<b>V</b> (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	168.84	1219.805	20.62	108.2

<b>Dn (cm)</b>	18.95	45.24	10.48	4.82
<b>H (m)</b>	12.67	21.23	4.39	2.88
<b>H0 (m)</b>	18.81	25.25	7.33	3.26
<b>IH (%)</b>	26.62	56	16	7.59

#### 7.4. Diagrama de Manejo de Densidad, de Volumen Comercial.

El segundo DMD desarrollado para este caso se centra en los diámetros que comprenden un rango de 15-35 cm mismos que son utilizados como volumen comercial, y donde el valor del *índice de Hart*, que es la base para el planteamiento de cortas cambia.

La dispersión d los sitios de referencia se muestra en la Fig. 4

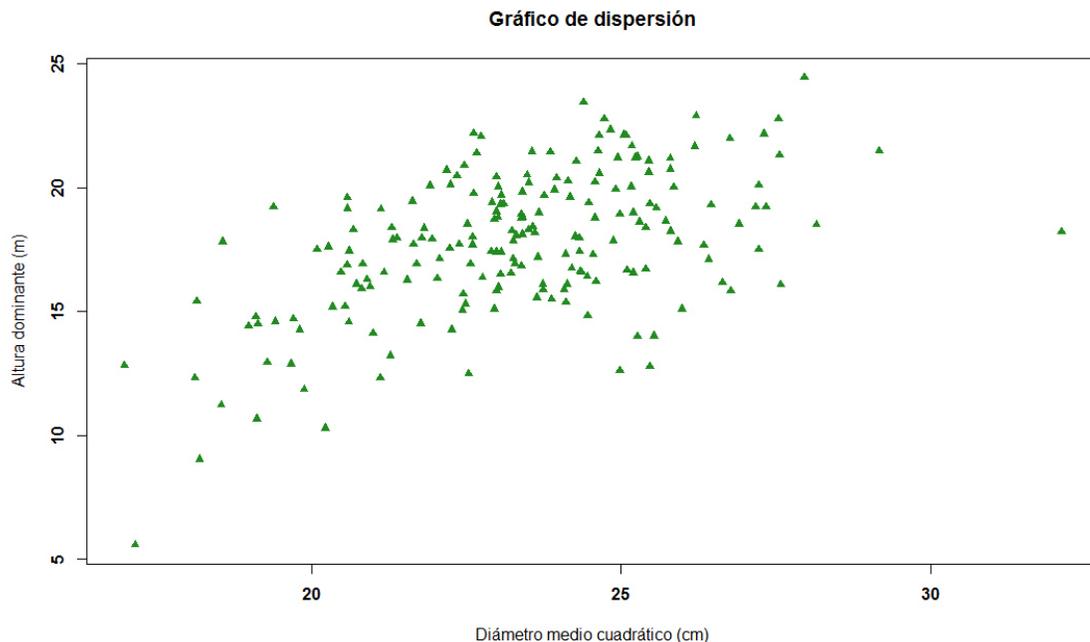


Fig. 4. Gráfico de dispersión de los sitios seleccionados para la elaboración de un DMD, incluyendo sólo el volumen comercial.

Para la representación final del DMD, basado sólo en los árboles destinados para volumen comercial, fue necesario realizar de la misma manera el ajuste de las ecuaciones para obtener los parámetros iniciales en la representación del gráfico como se muestra en las Tablas 5 y 6.

Tabla 5. Parámetros estimados del diámetro medio cuadrático considerando las dimensiones del volumen comercial

$$dg_{VC} = \beta_{01} * N^{\beta_{11}} * H0^{\beta_{21}}$$

Parameters	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
B01	12.35641	1.4940	8.27	<0.0001 ***
B11	0.38953	0.0444	8.77	< 0.0001 ***
B21	-0.08992	0.0189	-4.75	< 0.0001 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 Residual standard error: 2.756 on 193 degrees of freedom  
 Number of iterations to convergence: 8

Tabla 6. Parámetros estimados del volumen considerando las dimensiones de volumen comercial del rodal

$$V = \beta_{31} * dg^{\beta_{41}} * H0^{\beta_{5}} * N^{\beta_{61}}$$

Parameters	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
B31	0.000026	5.456e-6	4.68	<0.0001 ***
B41	2.317249	0.0837	27.70	<0.0001 ***
B51	0.811495	0.0417	19.46	<0.0001 ***
B61	0.994408	0.0102	97.82	<0.0001 ***

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1  
 Residual standard error: 7.795 on 192 degrees of freedom  
 Number of iterations to convergence: 5

El ajuste de las ecuaciones junto a los parámetros estimados queda de la siguiente manera:

$$dg = 12.35641 * N^{0.38953} * H0^{-0.08992}$$

Pseudo R<sup>2</sup>: **0.3729** RMSE: **1.9137** R<sup>2</sup> adj: **0.3658**

$$V = 0.000026 * dg^{2.317249} * H0^{0.811495} * N^{0.994408}$$

Pseudo R<sup>2</sup>: **0.9935** RMSE: **3.9869** R<sup>2</sup> adj: **0.9927**

La representación gráfica del DMD se muestra en la Fig. 5, haciendo énfasis en la isolínea que muestra el espaciamiento relativo de los árboles en el rodal y en el que se puede realizar el esquema de cortas.

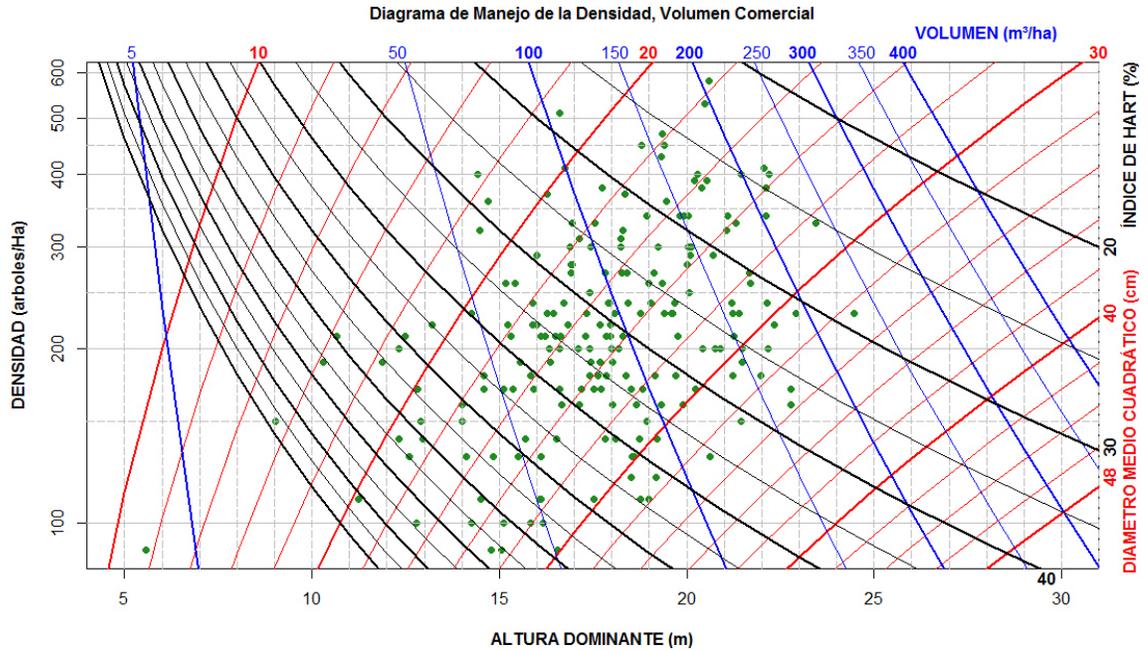


Fig. 5 Diagrama de Manejo de Densidad, con énfasis en las dimensiones de Volumen comercial

Los estadísticos descriptivos de los sitios de referencia para la elaboración del segundo DMD se muestran en la tabla:

Tabla 7. Estadística descriptiva de los sitios con dimensiones en volumen comercial

Variable	Media	Maximo	Minimo	SD
N	228.88	580	90	92.92
dg	23.32	32.11	16.98	2.4
G	9.82	27.67	2.08	4.33
V	90.17	273.093	6.55	46.81
Dn	22.74	32.02	16.9	2.33
H	15.75	21.6	5.58	2.5
H0	17.78	24.45	5.57	2.87
IH	44.64	203	22	17.92

## 7.5. Guía paso a paso para desarrollar un DMD en “R Project”

La guía paso a paso para la elaboración de un DMD se encuentra en línea en la plataforma de <https://github.com/FatyAcBe/Densidad/tree/Fatima>.

### Manual para la Construcción de un Diagrama de Manejo de Densidad en bosques Naturales

#### Introducción general

En la determinación de la productividad de un rodal, uno de los factores más importantes además del índice de sitio, es la densidad; motivo por el cual es utilizada como una variable de decisión y control en las intervenciones silvícolas (Daniel et al., 1982, citado por Escobedo Soto, 2014). Los diagramas de manejo de densidad, son modelos estáticos de rodal en los que se representa gráficamente la relación entre producción y densidad para los distintos estados de desarrollo de la masa (Newton, 1997).

En la actualidad el desarrollo de la tecnología permite transmitir información a través de internet a cualquier usuario del mismo, *GitHub* es una plataforma de desarrollo colaborativo de software para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones Git. Este manual está dirigido a los prestadores de Servicios Técnicos Forestales y se encontrará disponible en la red, para su reproducción y aplicación en las decisiones silvícolas del predio forestal a su cargo. El desarrollo de éste manual que permite la creación de Diagramas para el manejo de densidades en un predio sujeto a manejo forestal se divide en una serie de rutinas que se presentan a continuación.

#### Objetivo General

Desarrollar un Diagrama de Manejo de Densidad, basado en el Índice de Densidad de Rodales de Reineke (IDRR) y el Índice de Espaciamiento de Hart-Becking (IH) mediante la creación de una guía con rutinas empleando el software estadístico “R Project”, de tal manera que se pueda emplear en la toma de decisiones en el Manejo Forestal.

#### Obtención de datos

El presente estudio se llevó a cabo dentro de las inmediaciones del ejido de Pueblo Nuevo, Durango, México. Los datos utilizados para el desarrollo del Diagrama de Manejo de Densidad, de el presente caso provienen del inventario forestal, proporcionados directamente por la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 1008 El Salto, Durango. Corresponden a 196 parcelas, ubicadas en el Ejido Pueblo Nuevo, Durango, México. De acuerdo a Castedo-Dorado *et al* (2007), se trata de cubrir la máxima densidad existente en masas puras y regulares de esta especie. El tamaño de parcela es de 1000 m<sup>2</sup>. Para cada parcela seleccionada se midieron las siguientes variables dasométricas:

Número de árboles por hectárea (N), diámetro medio (DN) y altura media (H), diámetro medio cuadrático (dg), altura dominante (H0), área basal (G), volumen total (V) e índice de Hart-Becking (IH).

### Instalación del software principal *RStudio*.

Antes de utilizar éste manual se requiere instalar el software principal, los programas requeridos son software y se pueden descargar fácilmente y de forma gratuita. Están disponibles para *Windows*, *Mac* y el sistema operativo *Linux*. Se debe instalar *R* antes de instalar *RStudio*. Se puede descargar los programas desde:

**R:** <http://www.r-project.org>

**RStudio:** <https://www.rstudio.com/products/rstudio/download/> Gandrud,C. (2013)

### Importar datos a *Rstudio*

Para comenzar a trabajar en *Rstudio* es necesario importar los datos a el panel de trabajo, con un formato de archivo de tipo *.csv* delimitado por comas, de igual manera es necesario *asignar* un nombre a cada objeto creado para la identificación de los mismos más adelante, el símbolo de asignación `<-` creará e identificará los objetos para posteriores análisis.

```
setwd("C:/001Densidad/Manual")
sdmd<- read.csv("sdmd_Pino.csv")
```

Mismos datos que se pueden visualizar en el encabezado de la base de datos a través de `head`, e inspeccionar los elementos contenidos en la base de datos.

```
#Encabezado de La muestra
head(sdmd)
```

```
## SITIO ARBOL ESP dn h
## 1 1 1 2 31.0 19.0
## 2 1 2 2 18.4 12.0
## 3 1 3 2 27.4 21.6
## 4 1 4 2 27.8 22.3
## 5 1 5 2 9.7 8.0
## 6 1 6 8 11.6 7.8
```

### Estimaciones individuales

Para el desarrollo gráfico de un Diagrama de Manejo de Densidad es necesario la estimación de las variables dasométricas individuales y en masa de la siguiente manera.

*Área basal individual*

$$gi = \frac{\pi}{4} * (dn/100)^2$$

Dónde:  $gi$ = área basal individual (m<sup>2</sup>),  $dn$ = diámetro normal.

### Volumen individual

$$VTA = \beta_0 + \beta_1 * (dn^2 * h)$$

Dónde: VTA = Volumen total de un árbol con corteza (m<sup>3</sup>), \* $\beta_0$ = parámetro estimado (0.00509),  $\beta_1$  = Parámetro estimado (0.0000412) dn= Diámetro normal (cm), H= altura total (m).

### Estimaciones en masa

Se realizan una serie de estimaciones de masa que más adelante servirán para obtener los gráficos correspondientes:

### Número de árboles por hectárea

$$N = \sum n * 10$$

Dónde: N= Número de árboles por hectárea, n= árboles que están presentes en el sitio de muestreo.

```
#na*ha/sitio
```

```
ni<- tapply(sdmd$ARBOL, sdmd$SITIO, length)
N<- ni*10
```

### Diámetro medio

$$DN = \frac{\sum dn}{n}$$

Dónde: DN= Diámetro medio por parcela, dn= diámetro normal individual.

```
#Diámetro medio de las parcelas
```

```
DN<- round(tapply(sdmd$dn, sdmd$SITIO, mean), 2)
```

### Altura media

$$H0 = \frac{\sum h}{h}$$

Dónde: H= Altura media por parcela, h= altura individual.

```
# Altura media de las parcelas
```

```
H<- round(tapply(sdmd$h, sdmd$SITIO, mean), 2)
```

### Area basal

```
#Area basal individual (gi)
```

```
sdmd$gi<- round((pi/4)*((sdmd$dn/100)^2), 3)
```

```
head(sdmd)
```

```
## SITIO ARBOL ESP dn h gi
## 1 1 1 2 31.0 19.0 0.075
## 2 1 2 2 18.4 12.0 0.027
## 3 1 3 2 27.4 21.6 0.059
## 4 1 4 2 27.8 22.3 0.061
## 5 1 5 2 9.7 8.0 0.007
## 6 1 6 8 11.6 7.8 0.011
```

```
#Area basal
```

```
G<- round(tapply(sdmd$gi, sdmd$SITIO, sum),4)*10
```

```
head(G)
```

```
## 1 2 3 4 5 6
## 25.51 22.41 21.02 14.56 14.16 12.77
```

Volumen

$$V = \sum VTA * 10$$

```
sdmd$vta<- (0.00509)+0.0000412*((sdmd$dn)^2*(sdmd$h))
```

```
#Volumen
```

```
V<- round(tapply(sdmd$vta, sdmd$SITIO, sum),4)*10
```

```
head(V)
```

```
## 1 2 3 4 5 6
## 253.465 196.903 251.020 93.655 80.317 72.522
```

Diámetro medio cuadrático

$$dg = \sqrt{\frac{40000}{\pi} * \frac{G}{N}}$$

```
#diametro medio cuadratico
```

```
dg<- round(sqrt((40000/pi)*(G/N)),2)
```

Altura dominante

$$H0 = \frac{\sum Hdmax}{100}$$

Para la obtención de la altura dominante es necesario el uso de un bucle for o "bucle repetitivo" que nos permita obtener los datos requeridos, en este caso se utilizó la información para obtener también el diámetro dominante "D0".

### #Altura dominante

```
resultados<-data.frame(Sitios=c(1:196),H0=rep(0,196),D0=rep(0,196))

for(i in 1:196){
  data <- sdmd[which(sdmd$SITIO==i),]
  data <- data[order(data$dn, decreasing = TRUE),]
  H0<-mean(data$h[1:10])
  D0<-mean(data$dn[1:10])

  resultados[i,"H0"]<-H0
  resultados[i,"D0"]<-D0
}
```

Para la compilación de los datos es necesario la creación de un `data.frame` que nos permite agrupar las variables obtenidas.

Nombramos a esta tabla *Resultados*

```
resultados$N<-N
resultados$DN<-DN
resultados$H<-H
resultados$V<-V
resultados$G<-G
resultados$dg<-dg
```

```
head(resultados)
```

##	Sitios	H0	D0	N	DN	H	V	G	dg
## 1	1	22.61	33.20	780	18.64	13.98	253.465	25.51	20.41
## 2	2	20.22	31.88	690	18.76	12.78	196.903	22.41	20.34
## 3	3	24.90	41.13	340	25.33	17.53	251.020	21.02	28.06
## 4	4	14.26	23.12	1090	12.21	9.99	93.655	14.56	13.04
## 5	5	12.27	17.75	1340	11.20	9.16	80.317	14.16	11.60
## 6	6	11.21	18.44	1150	11.43	9.24	72.522	12.77	11.89

*Índice de Hart-Becking*

$$IH = K * \frac{100}{\sqrt{100}} * H0$$

```
resultados$ih<-round(((4/3)^0.25*(100/(sqrt(resultados$N)*resultados$H0))),2)
```

```
resultados$IH<-resultados$ih*100
```

### Metodología para la Construcción de un Diagrama de Manejo de Densidad

Siguiendo la metodología propuesta por Barrio Anta & Álvarez González, (2005) y Pérez-Cruzado, et al. (2009), la construcción de un diagrama de manejo de densidad se realiza bajo los siguientes pasos:

1. Representación gráfica del número de árboles por hectárea (N) en el eje de las ordenadas y la altura dominante (H0) en el eje de las abscisas.
2. Índice de caracterización de espesura elegido, en este caso de estudio se elige el Índice de Hart-Becking.
3. Un sistema de dos ecuaciones no lineales.

La primera ecuación propuesta permite predecir el diámetro medio cuadrático (dg), a partir del número de árboles por hectárea y la altura dominante. Esta ecuación está basada en la relación que existe entre el tamaño medio de los árboles, la densidad y un indicador de la productividad.

$$dg = \beta_0 * N^{\beta_1} * H0^{\beta_2}$$

La segunda ecuación estima la productividad del rodal expresada como la relación existente entre el volumen de masa con el volumen de un árbol representativo (dado por el producto del diámetro medio cuadrático y la altura dominante) y el número de pies por hectárea.

$$V = \beta_3 * dg^{\beta_4} * H0^{\beta_5} * N^{\beta_6}$$

#### *Ajuste de ecuaciones*

El siguiente paso antes de obtener el gráfico que representa un *DMD* consiste en obtener los parámetros de ajuste. El *DMD* a desarrollar se construye a partir del empleo del Índice de Hart-Becking, y dos funciones base, modelos no lineales que a través de un proceso iterativo permite estimar los parámetros para realizar la representación del gráfico.

Al realizar este proceso se requiere una convergencia positiva, utilizando la función `nls` en este paso es importante agragar valores iniciales de partida para facilitar el proceso.

El ajuste de los modelos no lineales fue realizado a partir de un proceso iterativo dando valores de partida inicial para calcular el parámetro final, esperando una convergencia positiva, una vez obtenidos los parámetros, se calcularon los valores del coeficiente de pseudo  $R^2$  y RMSE, ya que "R Project" no los proporciona, pues estos estadísticos de bondad de ajuste tienen sentido únicamente para modelos lineales, la función se muestra a continuación.

```
fit.stat <-  
  function(Fit){  
    .R2Adj <- 1-((sum(resid(Fit)^2))/(sum(((predict(Fit)+resid(Fit))-  
mean(predict(Fit)+resid(Fit)))^2))) * (((length(resid(Fit)))-1)/((length  
(resid(Fit)))-length(coef(Fit))))  
    .obs <- predict(Fit)+resid(Fit)  
    .PseudoR2 <- summary(lm(predict(Fit)~.obs))$r.squared  
    .RMSE <- sqrt(sum(resid(Fit)^2)/df.residual(Fit))  
    result <- data.frame(R2Adj=.R2Adj, PseudoR2=.PseudoR2, RMSE=.RMSE)  
    return(result)  
  }
```

```
#ajuste de modelo prediccion diametro cuadratico (dg)  
#ajuste de modelos no lineales a traves de la funcion (nls)
```

```
dg_model<-nls(dg~b0*H0^b1*N^b2,data=resultados,start=list(b0=16,b1=0.8
,b2=-0.4))
```

```
str(dg_model)
```

```
## List of 6
## $ m          :List of 16
## ..$ resid    :function ()
## ..$ fitted   :function ()
## ..$ formula   :function ()
## ..$ deviance  :function ()
## ..$ lhs       :function ()
## ..$ gradient  :function ()
## ..$ conv      :function ()
## ..$ incr      :function ()
## ..$ setVarying:function (vary = rep_len(TRUE, length(useParams)))
## ..$ setPars   :function (newPars)
## ..$ getPars   :function ()
## ..$ getAllPars:function ()
## ..$ getEnv    :function ()
## ..$ trace     :function ()
## ..$ Rmat      :function ()
## ..$ predict   :function (newdata = list(), qr = FALSE)
## ..- attr(*, "class")= chr "nlsModel"
## $ convInfo    :List of 5
## ..$ isConv    : logi TRUE
## ..$ finIter   : int 5
## ..$ finTol    : num 5.34e-07
## ..$ stopCode  : int 0
## ..$ stopMessage: chr "converged"
## $ data        : symbol resultados
## $ call        : language nls(formula = dg ~ b0 * H0^b1 * N^b2, data
= resultados, start = list(b0 = 16,      b1 = 0.8, b2 = -0.4), algorit
|__truncated__ ...
## $ dataClasses: Named chr [1:2] "numeric" "numeric"
## ..- attr(*, "names")= chr [1:2] "H0" "N"
## $ control     :List of 5
## ..$ maxiter   : num 50
## ..$ tol       : num 1e-05
## ..$ minFactor: num 0.000977
## ..$ printEval: logi FALSE
## ..$ warnOnly  : logi FALSE
## - attr(*, "class")= chr "nls"
```

```
summary(dg_model)
```

```
##
## Formula: dg ~ b0 * H0^b1 * N^b2
##
## Parameters:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
```

```
## b0  8.95157    2.10009    4.262 3.16e-05 ***
## b1  0.86353    0.06082    14.197 < 2e-16 ***
## b2 -0.27081    0.02076   -13.044 < 2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 2.756 on 193 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 5
## Achieved convergence tolerance: 5.339e-07
```

```
coefficients(dg_model)
```

```
##          b0          b1          b2
## 8.9515736 0.8635348 -0.2708079
```

Y se realiza el mismo procedimiento con la fórmula de *volume*

```
#Modelo prediccion de volumen
```

```
#Volumen ajuste de modelo
```

```
#parametros de inicio
```

```
#d=0.00006
```

```
#e=2
```

```
#f=0.8
```

```
#g=0.9
```

```
V_model<-nls(V~b3*dg^b4*H0^b5*N^b6, data = resultados,start = list(b3=
0.00006,
```

```
b4=2,b5
```

```
=0.8,b6=0.9))
```

```
str(V_model)
```

```
## List of 6
```

```
## $ m          :List of 16
```

```
## ..$ resid    :function ()
```

```
## ..$ fitted   :function ()
```

```
## ..$ formula  :function ()
```

```
## ..$ deviance :function ()
```

```
## ..$ lhs      :function ()
```

```
## ..$ gradient :function ()
```

```
## ..$ conv     :function ()
```

```
## ..$ incr     :function ()
```

```
## ..$ setVarying:function (vary = rep_len(TRUE, length(useParams)))
```

```
## ..$ setPars   :function (newPars)
```

```
## ..$ getPars  :function ()
```

```
## ..$ getAllPars:function ()
```

```
## ..$ getEnv   :function ()
```

```
## ..$ trace    :function ()
```

```
## ..$ Rmat      :function ()
## ..$ predict   :function (newdata = list(), qr = FALSE)
## ..- attr(*, "class")= chr "nlsModel"
## $ convInfo   :List of 5
## ..$ isConv    : logi TRUE
## ..$ finIter   : int 5
## ..$ finTol    : num 4.31e-06
## ..$ stopCode  : int 0
## ..$ stopMessage: chr "converged"
## $ data       : symbol resultados
## $ call       : language nls(formula = V ~ b3 * dg^b4 * H0^b5 * N^b
6, data = resultados, start = list(b3 = 6e-05,      b4 = 2, b5 = 0.8,
b|__truncated__ ...
## $ dataClasses: Named chr [1:3] "numeric" "numeric" "numeric"
## ..- attr(*, "names")= chr [1:3] "dg" "H0" "N"
## $ control    :List of 5
## ..$ maxiter  : num 50
## ..$ tol      : num 1e-05
## ..$ minFactor: num 0.000977
## ..$ printEval: logi FALSE
## ..$ warnOnly : logi FALSE
## - attr(*, "class")= chr "nls"
```

```
summary(V_model)
```

```
##
## Formula: V ~ b3 * dg^b4 * H0^b5 * N^b6
##
## Parameters:
##      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## b3 6.067e-05  5.538e-06   10.95  <2e-16 ***
## b4 2.114e+00  1.146e-02  184.51  <2e-16 ***
## b5 8.357e-01  3.073e-02   27.20  <2e-16 ***
## b6 9.431e-01  8.031e-03  117.43  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 7.795 on 192 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 5
## Achieved convergence tolerance: 4.306e-06
```

Una vez finalizado este proceso, y habiendo verificado la significancia en los parámetros obtenidos con un nivel de confianza del 95%, es posible continuar al siguiente paso.

Para ello es necesario la asignación de los parámetros ajustados de la siguiente manera:

```
# Parámetros -----
-----
b0<-8.95157
```

```
b1<-0.86353
b2<--0.2708079
b3<-0.000066467
b4<-2.11372100
b5<-0.836524
b6<-0.9430748
```

### Elaboración del Gráfico

Para comenzar a diseñar el producto final es necesario tener como base una gráfica que nos muestre la relación

```
plot(resultados$H0,resultados$N,
      font.lab=2,log = "y",xlim = c(5,35), col="forestgreen",
      xlab = "ALTURA DOMINANTE (m)", ylab = "DENSIDAD (arboles/Ha)",
      main = "Diagrama de Manejo de Densidad", pch=17)
```

Posterior a la inspección gráfica, se dibujan en el líneas horizontales y verticales con escala logarítmica, que más adelante sirven para poder interpretar de mejor manera los resultados plasmados en el gráfico final.

Las líneas horizontales y verticales se dibujan a través de un código, de la siguiente manera.

```
#Lineas horizontales
#para representar La Densidad (arboles/Ha)

N.lineas<-data.frame(N=seq(from=0,to=2000,by=100),wide=rep(1,21))

for(i in 1:21){
  abline(h=N.lineas[i,"N"], col="gray",lwd=N.lineas[i,"wide"])
}
```

Las líneas verticales se dibujan con el siguiente código

```
#Lineas verticales
#para representar La altura dominante (H0)

H0.linea<-data.frame(H0=seq(from=5,to=35,by=1),wide=rep(0.5,31))

for(i in 1:31) {
  abline(v=H0.linea[i,"H0"], col="gray",lwd=H0.linea[i,"wide"],lty=5)
}
```

Las tres ecuaciones que quedarán plasmadas, se representan en forma de *isolíneas* una vez despejadas y ajustadas. Las *isolíneas* representan:

- Diámetro medio cuadrático (dg)
- Volumen ( $m^3/Ha$ )
- Índice de Hart-Becking (IH)

### Isolíneas de dg

### *#Isolinea de dg*

```
dg.curva<- data.frame(dg=seq(from=5, to=45, by=2), wide=c(2,1,1,1,1,2,
1,1,1,1,2,1,
1,1,1,2,1,1,1,1,2))
```

```
for(i in 1:nrow(dg.curva)){
  curve((dg.curva[i,"dg"]/(b0*x^b1))^(1/b2), col="red",add =TRUE,
        from=0, to=100, lwd=dg.curva[i,"wide"])
}
```

### **Isolneas de Volumen**

#### *#isolneas de Volumen*

```
V.curva<-data.frame(V=seq(from=10, to=460, by=50),wide=c(2,1,2,1,2,1,2
,1,2,1))
```

```
for(i in 1: nrow(V.curva)){
  curve((V.curva[i,"V"]/(b3*b0^b4*x^(b4*b1+b5)))^(1/(b2*b4+b6)), col="
blue",
        add = TRUE, from = 0, to=100, lwd=V.curva[i,"wide"])
}
```

### **Isolneas del Indice de Hart-Becking**

#### *#Isolneas de Indice de Hart-Becking*

```
IH.linea<-data.frame(IH=seq(from=14,to=60,by=4),wide=c(2,1,2,1,2,1,1,2
,1,2,1,2))
```

```
for(i in 1:nrow(IH.linea)){
  curve(((4/3)^0.25*(1000/(IH.linea[i,"IH"]*x)))^2,col="black",add =
TRUE,
        from = 0,to=100, lwd=IH.linea[i, "wide"])
}
```

## 8. DISCUSIÓN

### *Ajuste de los parámetros estimados.*

La precisión de los parámetros obtenidos mediante el ajuste simultáneo de las ecuaciones base para el desarrollo del gráfico tuvieron un ajuste significativo sin embargo un poco bajos en comparación a los resultados a los obtenidos por los autores Barrio Anta & Álvarez González, (2005) y (Castedo-Dorado et al., 2007), debido a que éstos fueron aplicados sobre masas puras de plantaciones forestales de *Quercus robur* L. y *Pinus radiata* en Galicia, España, por otro lado la precisión fue altamente similar a la obtenida por Corral-Rivas *et al.*, (2015) y Escobedo Soto, (2014), quienes desarrollaron un DMD para masas de bosques naturales.

### *Diámetro medio cuadrático de los Bosque naturales*

La media del diámetro medio cuadrático obtenida en este estudio de caso de un bosque natural fue de 21 cm y fue similar al obtenido en un bosque de coníferas con un nivel de producción medio por Corral-Rivas et al., (2015), con un dg medio = 25 cm, y por Escobedo Soto, (2014) con un dg medio = 23 cm en un bosque natural.

### *Diagramas de Manejo de Densidad basados en el Índice de Hart como una herramienta de decisión silvícola*

El desarrollo de los Diagramas de Manejo de Densidad basados en el Índice de Hart, permite realizar la planeación silvícola en la determinación e intensidad de las cortas de acuerdo al nivel de espaciamiento deseado que evitan la existencia elevada de la mortalidad natural y que permite una adecuada ocupación del terreno en común acuerdo con lo concluido por Diéguez A. et al., (2009).

### *Tecnologías de la información*

En este caso de estudio se desarrolló la metodología para la construcción de un Diagrama de Manejo de Densidad basado en el Índice de Hart mismo que está disponible en la Web a través de la plataforma de *GitHub*, con el fin de divulgar

la información científica y satisfacer las necesidades de los manejadores del bosque, afirmando que estos gráficos permiten adoptar decisiones silvícolas de manera efectiva a un bajo costo entendiendo la evolución del ecosistema Valbuena *et al.*, (2008).

## 9. CONCLUSIÓN

Del presente trabajo se concluye:

- Los resultados obtenidos ratifican la hipótesis planteada en el proyecto afirmando que el uso de las tecnologías de la información facilita el desarrollo de un DMD y puede ser adecuado a las necesidades de los manejadores del bosque.
- Los modelos estáticos utilizados para el desarrollo de DMD facilitan la adecuada planificación y seguimiento silvícola maximizando la utilización de la productividad del sitio funcionando como una herramienta en la toma de decisiones en el manejo forestal.
- El Índice de Hart como referencia del control adecuado de los niveles de competencia del rodal permite al usuario final establecer un esquema de cortas de acuerdo a las necesidades del rodal.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Barrio Anta, M., & Álvarez González, J. G. (2005). Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry*, Vol. 78(Número: 3), 209–216. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpi033>
- Bravo, F., Montero, G., & Del Río, M. (1997). Indices de densidad de las masas forestales. *Ecología*, 11, 177–187.
- Castedo-Dorado, F., Álvarez-Álvarez, P., Crecente-Campo, F., & Barrio-Anta, M. (2007). Consideración de la estabilidad de la masa en los diagramas de manejo de la densidad. *Actas de La II Reunión Sobre Aspectos Prácticos de La Modelización Forestal*, Vol. 74, 9–11.
- Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., Álvarez-Álvarez, P., & Barrio-Anta, M. (2009). Development of a stand density management diagram for radiata pine stands including assessment of stand stability. *Forestry*, 82(1), 1–16. <http://doi.org/10.1093/forestry/cpm032>
- Castillo, L. (2012). Introducción — Conociendo GitHub 0.1 documentation. Retrieved March 16, 2017, from <http://conociendogithub.readthedocs.io/en/latest/data/introduccion/>
- Chauchard, L. M., & Olalde, F. M. (2004). Diagrama de manejo de la densidad de masas de pino radiata en el país vasco. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 166(18), 161–166.
- CONAFOR. (2014). *Comunidades instructoras*. Zapopan, Jalisco, México. Retrieved from [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/80593/Comunidades\\_Instructoras.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/80593/Comunidades_Instructoras.pdf)
- Corral-Rivas, S., Álvarez-González, J. G., Corral-Rivas, J. J., Wehenkel, C., López-Sánchez, C. A., & De Correspondencia, A. (2015). Diagramas para el manejo de la densidad en bosques mixtos e irregulares de Durango, México Density management diagrams in mixed and uneven-aged forests of Durango, México. *BOSQUE*, 36(3), 409–421. <http://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300008>
- Dabish, L., Stuart, C., Tsay, J., & Herbsleb, J. (2012). Social Coding in GitHub: Transparency and Collaboration in an Open Software Repository. *Toolkits and Software Development*, 1277–1286. Retrieved from [http://delivery.acm.org/10.1145/2150000/2145396/p1277-dabbish.pdf?ip=148.234.173.201&id=2145396&acc=ACTIVE SERVICE&key=6F4CCF05E2930152.94A0735B799D614C.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&CFID=912453480&CFTOKEN=56533511&\\_\\_acm\\_\\_=1489690542\\_60446f486](http://delivery.acm.org/10.1145/2150000/2145396/p1277-dabbish.pdf?ip=148.234.173.201&id=2145396&acc=ACTIVE SERVICE&key=6F4CCF05E2930152.94A0735B799D614C.4D4702B0C3E38B35.4D4702B0C3E38B35&CFID=912453480&CFTOKEN=56533511&__acm__=1489690542_60446f486)
- Dean, T. J., & Clark Baldwin, V. (1993). Using a Density- Management Diagram to Develop Thinning Schedules for Loblolly Pine Plantations, (August).
- Diéguez A., U., Rojo, A. A., Castedo D., F., Álvarez G., J. G., Barrio A., M., Crecente C, F., & Sánchez R., F. (2009). *Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia* (Dirección). Lugo, España. Retrieved from [http://www.mediouralemar.xunta.es/fileadmin/arquivos/publicacions/herramientas\\_selvicolos.pdf](http://www.mediouralemar.xunta.es/fileadmin/arquivos/publicacions/herramientas_selvicolos.pdf).

- Escobedo Soto, A. S. (2014). *Diagrama de manejo de densidad para rodales naturales del ejido el largo, chihuahua*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/4294/1/1080253739.pdf>
- FAO. (2004). *Estado Actual del Manejo y Ordenación Forestal en México. Estado y Tendencias de la Ordenación Forestal en 17 países de América Latina*. Roma, Italia. Retrieved from <http://www.bing.com/search?q=resumen+del+estado+actual+del+manejo+y+ordenación+forestal&src=IE-SearchBox&FORM=IENTTR&conversationid=>
- GitHub, . (2016). GitHub Guides. Retrieved March 16, 2017, from <https://guides.github.com/activities/hello-world/#what>
- Hernández Ramos, J., García Magaña, J. J., Muñoz Flores, H. J., García Cuevas, X., Sáenz Reyes, T., Flores López, C., & Hernández Ramos, A. (2013). Guía de Densidad para manejo de Bosques Naturales de Pinus teocote Schlecht. et Cham. En Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales, Vol. 4*(Número: 19), 62–77.
- Newton, P. F. (1997). Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management, 98*(3), 251–265. [http://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00086-8](http://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00086-8)
- Newton, P. F. (2003). Stand density management decision-support program for simulating multiple thinning regimes within black spruce plantations. *Agriculture, 38*, 45–53. Retrieved from [www.elsevier.com/locate/compag](http://www.elsevier.com/locate/compag)
- Penner, M., Swift, D. E., Gagnon, R., & Brissette, J. (2006). A stand density management diagram for balsam fir in New Brunswick. *The Forestry, Vol. 82*(Número: 5), 700–711. Retrieved from <http://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc82700-5>
- Pérez-Cruzado, C., RodríguezDacosta, L. M., Fernández-Rivas, E., Merino, A., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2009). Diagramas de manejo de la densidad para plantaciones de Eucalyptus nitens Maid. en el norte de España con evaluación del carbono fijado en biomasa arbórea. *5to Congreso Forestal Español, (1)*, 2–13. <http://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Swift, E., Penner, M., Gagnon, R., Knox, J., Swift, E., & Gagnon, R. (2007). A stand density management diagram for spruce – balsam fir mixtures in New Brunswick. *The Forestry Chronicle, Vol. 83*(Número 2), 187–197. Retrieved from <http://pubs.cif-ifc.org/doi/pdf/10.5558/tfc82700-5>
- Torres-Rojo, J. M., & Velázquez-Martínez, A. (2000). Índice de densidad relativa para rodales coetáneos mezclados. *Agrociencia, 34*(núm. 4), 497–507.
- Trujillo Bautista, J. M. (2009). El Ejido, Símbolo de la Revolución Mexicana. *Problemas Sociales Y Regionales En América Latina: Estudio de Casos*, pp.101.
- Urcera, J. (2012). R y RStudio, instalación y primeros pasos. | FLOSS Square in Freedom City. Retrieved March 16, 2017, from <http://blog.urcera.com/wordpress/?p=242>
- Valbuena, P., Peso, C., & Bravo, F. (2008). Stand Density Management Diagrams for two Mediterranean pine species in Eastern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas Y Recursos Forestales, 17*(2), 97–104. <http://doi.org/10.5424/srf/2008172-01026>
- Venables, W. N., Smith, D. M., & R Core Team, . (2017). An Introduction to R Notes on R: A



Programming Environment for Data Analysis and Graphics Version 3.3.3 (2017-03-06). *R. Gentleman & R. Ihaka Copyright c.* Retrieved from <https://cran.r-project.org/doc/manuals/r-release/R-intro.pdf>