



Enseñar la explotación de la tierra,
no la del hombre

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

**“INCLUSIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO EN
EL MÉTODO MEXICANO DE ORDENACIÓN DE
MONTES”**

T E S I S



QUE COMO REQUISITO PARCIAL DIRECCION GENERAL ACADEMICA
PARA OBTENER EL GRADO DE DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

PRESENTA

MAIRA CRUZ LOAEZA

Chapingo, Texcoco, Estado de México.
Junio de 2008



“Inclusión de modelos de crecimiento en el Método Mexicano de Ordenación de Montes”

Tesis realizada por **Maira Cruz Loaeza** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

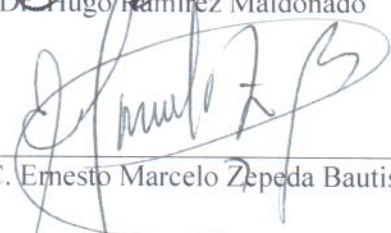
MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:



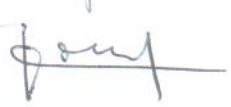
Dr. Hugo Ramírez Maldonado

ASESOR:



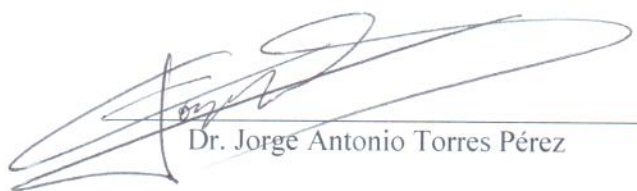
M. C. Ernesto Marcelo Zepeda Bautista

ASESOR:



Dr. José Luis Romo Lozano

ASESOR:



Dr. Jorge Antonio Torres Pérez

Chapingo, Texcoco, Edo. de México

Junio de 2008

DEDICATORIAS

Al creador del universo y la humanidad, Jehová dios, por todas las bendiciones vertidas mediante el único medio que enviaste para nuestra salvación, Jesucristo.

A mi madre, Emperatriz López Vera, por estar conmigo en cada momento de mi vida, guiándome cariñosamente con una palabra oportuna... te adoro mamita.

A mi padre Sadot Silvano García Quiroz, la persona que más admiro, gracias por creer en mí y dejarme ser parte de sus vidas.

A mi madre, Isabel Loeza Cruz, la persona maravillosa que me dio la vida, tu ausencia es grande pero sigues en mis recuerdos y corazón.

A mis hermanos: Francisco, el hermano mayor y compañero de infancia; Víctor Manuel, aunque la distancia nos separa, nos une un lazo difícil de romper; Katia, por el cariño y afecto que nos brindamos; Marcos, por aceptarme tal cual soy, bondad caracterizan tu esencia; Alejandra, con quien comparto grandes cosas y lindos instantes siempre presentes en mi corazón.

A Mis sobrinos: Marisabel, Alejandro, Karla, Ernesto, Genezareth, Odette y Jaritza, quienes con sus cualidades y actitudes especiales llenan mi vida de alegría y felicidad; Silvana Valeria, tus gestos y sonrisas hacen vibrar mi alma...te quiero mucho mi linda nena.

Raúl Martínez: Novio y amigo, la persona que está conmigo en cualquier circunstancia de la vida.

A mis primos: Reina, Olga, Fabiola, José Manuel, Margarito y Marcos por hacerme sentir querida y en armonía con la familia.

A mis tíos: Angélico, Magdaleno, Pablo, Carmela, Inés, Ángela, Max, Goly y Laura, por apreciarme y contar siempre con ustedes.

La familia Galindo Hernández: Laura, Noe y su hija Selene, por permitirme participar en el lecho familiar y encontrar en ustedes muy buenos amigos.

Los profesores Alma y Francisco, por siempre brindarme una palabra de ánimo.

María Angélica: Compañera y amiga; el tiempo se encargó de unirnos para ser cómplices en esta travesía y conocer la esencia del ser humano.

Lorena, Omar, Uriel y Mario: excelentes amigos y compañeros, con quienes compartí largas horas de trabajo, amenas gracias a sus presencias.

Bogarth, Lázaro, Miguel, Fabián, Anita y Laura: por la amistad y su ánimo entusiasta en el salón de clases y aun más allá de éstos.

A la Sra. Rosalinda de Palafox, por su apoyo incondicional y vigilancia constante de mi espiritualidad.

A la familia Martínez Gutiérrez, por todas las muestras de afecto... igualmente correspondidas.

A la generación 2003 de ingenieros forestales, que siempre está en mi corazón.

Sinceramente:

Maira Cruz Loaeza

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) institución que por medio de su sistema de becas me ha permitido cursar los estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, siempre comprometida con México para educarnos y formar hombres y mujeres de bien.

Al Dr. Hugo Ramírez Maldonado, extraordinario ser humano, que en todo momento me dio la confianza para seguir en este camino; mis más sinceros agradecimientos, porque entre sus múltiples ocupaciones, pudo regalarme su valioso tiempo para finalizar un proyecto más en mi vida.

Al M.C. Ernesto Marcelo Bautista Zepeda, excelente profesor y pieza clave en este trabajo, quien a pesar de estar en su año de descanso, no se negó a codirigir esta investigación, mil gracias por estar siempre presto a resolver las dudas que se presentaron en todo momento.

Al Dr. José Luis Romo Lozano, por las valiosas contribuciones realizadas a la investigación y por estar dispuesto a la supervisión del mismo.

Al Dr. Jorge Antonio Torres Pérez, por ser una persona accesible en todo momento, gracias por las observaciones y contribuciones a la investigación.

Al Programa de Postgrado de la División de Ciencias Forestales, por sus destacados profesores siempre dispuestos a compartir tiempo para enseñar a las nuevas generaciones, haciendo posible nuestra formación profesional.

A la Dra. Amparo Borja de la Rosa, debido a las facilidades otorgadas, hizo más amena mi estancia en el postgrado.

Al Dr. Dante Arturo Rodríguez Trejo, por dar un voto de confianza a mi desempeño profesional.

Al Dr. Hubert Tchikoue Maga, excelente persona que me brindó su amistad y dio crédito a mi aptitud en el trabajo, gracias por tener siempre un gesto noble para conmigo.

Al Ing. Guillermo Carrillo, por brindarme su ayuda y encontrar en usted a un buen amigo.

A Bogarth Crisanty por su apoyo incondicional en la solución de problemas de cálculo en esta investigación.

A Rubén Martínez Gutiérrez, por dedicarme un poco de tu tiempo y contribuir en la culminación de mi trabajo.

DATOS BIOGRÁFICOS

Maira Cruz Loaeza nació en 1980 en la ciudad de Pinotepa Nacional, en el estado de Oaxaca. De 1986 a 1992 estudió en la escuela primaria “Justo Sierra”. Cursó la secundaria “José A. Baños Aguirre” de 1992 a 1995. Los estudios de preparatoria los realizó en el Colegio de Bachilleres del estado de Oaxaca, plantel 03 “Pinotepa Nacional” de 1995 a 1998. De 1999 a 2003, estudió la carrera de Ingeniero Forestal en la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título de ingeniero forestal en el año 2005 con el proyecto de tesis denominado “Potencial productivo de cogollos de palma real (*Sabal mexicana* Mart.) en el ejido de José María Morelos, Mpio. de Santa María Huazolotitlán, Distrito de Santiago Jamiltepec, Oaxaca”.

De 2003 al 2006 formó parte de un bufete de prestación de servicios técnicos forestales en la ciudad de Pinotepa Nacional, participando en la promoción y organización del aprovechamiento forestal de productos maderables y no maderables, realizando catastro predial forestal, inventario forestal y elaboración de programas de manejo forestal.

En el año 2006, participó en la Evaluación Nacional del Programa de Desarrollo Forestal (PRODEFOR 2005), participando en la captura y procesamiento de la información proveniente de campo. En 2007 colaboró en la Evaluación Nacional de Incendios Forestales ocurridos en 2006, coordinando brigadas en campo, captura y análisis de la información.

De enero de 2006 a diciembre de 2007, prosiguió con estudios de postgrado en el programa de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo.

BIOTECNIA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

"INCLUSIÓN DE MODELOS DE CRECIMIENTO EN EL MÉTODO MEXICANO DE ORDENACIÓN DE MONTES"

"INCLUSION OF GROWTH MODELS IN THE MEXICAN METHOD OF FOREST MANAGEMENT"

Maira Cruz Loeza¹ Hugo Ramírez Maldonado²

RESUMEN

Se propone incluir alguno de los modelos de crecimiento (Schumacher, Chapman-Richards, Weibull o Hossfeld) en el cálculo del volumen al final del ciclo de corta en el MMOM. La base de datos para este propósito, se obtuvo a partir de un proceso de simulación de árboles individuales manipulados en hojas de cálculo electrónicas. El primer paso consistió en evaluar la información proveniente de la simulación; posteriormente, a estos datos se le aplicaron los cálculos clásicos del Método Mexicano de Ordenación de Montes, interés especial en el volumen al final del ciclo de corta. Se hizo la comparación del incremento corriente entre los previstos por la ecuación del MMOM y los modelos de crecimiento, estos últimos mediante el criterio de la primera derivada.

Por otro lado, se obtuvieron los volúmenes individuales del arbolado remanente al final del ciclo de corta (de cada modelo propuesto) suponiendo una curva de crecimiento anamórfica y que el valor asintótico era común para todos los árboles, se hizo que el crecimiento del árbol dependiera de la edad y de los parámetros de las ecuaciones.

ABSTRACT

In this work is proposed to include some of the growth models (Schumacher, Chapman-Richards, Weibull or Hossfeld) in calculating the volume at the end of the planning period, as part of the Mexican Method of Forest Management (Método Mexicano de Ordenación de Montes, MMOM). The database for this purpose was obtained from a simulation process of individual trees manipulated in electronic spreadsheets. The first step consisted in evaluating the information coming from the simulation; then from this data was applied the classic calculations of the MMOM, with special interest in the last volume of the planning period. A comparison was made between the current equational increase of the MMOM and the growth models, the latter through the criterion of the first derivative.

On the other hand, volumes were obtained of individual trees remaining at the end of the planning period (of each proposed model), assuming an anamorphic growth curve and that the asymptotic value was common for all trees, and that the growth of the tree depended on the age and the equation parameters.

1. Tesista de Maestría en Ciencias Forestales.

2. Profesor-investigador, DICIFO, UACH.

Por último se presenta una discusión sobre los volúmenes finales predichos por los modelos de crecimiento y los logrados por el MMOM.

Palabras claves: MMOM, modelos de crecimiento, Schumacher, Chapman-Richards, Weibull, Hossfeld.

Also is included a discussion of the final volume predictions from the growth models and the growth in MMOM.

Key words: MMOM, growth models, Schumacher, Chapman-Richards, Weibull, Hossfeld.

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE ANEXOS	IV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1 PATRONES ESPACIALES Y FACTORES CAUSALES DE LA DISTRIBUCIÓN ECOLÓGICA DE POBLACIONES	4
4.2 EL MANEJO INTEGRAL FORESTAL	7
4.3 PARTICULARIDADES DEL MÉTODO MEXICANO DE ORDENACIÓN DE MONTES	7
4.3.1 Criterios silvícolas del Método Mexicano de Ordenación de Montes	9
4.3.2 Posibilidad aprovechable	12
4.3.3 Estimación de incrementos volumétricos	16
4.3.4 Diseño de muestreo	18
4.3.5 Situación actual del MMOM	19
4.4 MODELOS DE CRECIMIENTO EN EL MANEJO FORESTAL	20
4.4.1 Generalidades sobre modelos de crecimiento	21
4.4.2 Clasificación de los modelos de crecimiento	23
4.4.2.1 Modelos de totalidad de rodal	24
4.4.3 Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales	25
4.4.4 Modelos de interés para la predicción del crecimiento e incremento de masas forestales	27
4.4.4.1 Modelo Schumacher	28
4.4.4.2 Modelo de Chapman-Richards	30
4.4.4.3 Modelo Weibull	32
4.4.4.4 Modelo Hossfeld	33
5. METODOLOGÍA	35
5.1 BASE DE DATOS	35
5.1.1 Análisis del comportamiento del arbolado en el predio	40
5.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO MEXICANO DE ORDENACIÓN DE MONTES	43
5.2.1 Cálculo del incremento en volumen por el método de Loetsch	43
5.2.2 Cálculos básicos en el MMOM	45
5.3 AJUSTE DE LOS MODELOS DE CRECIMIENTO AL ARBOLADO RESIDUAL O EN PIE DESPUÉS DE LA CORTA	49
5.3.1 Estimación de incrementos	49
5.3.2 Pronóstico de las variables diámetro y altura al final del ciclo de corta	50
5.3.3 Volumen final (ER) al ciclo de corta ajustando modelos de crecimiento	52
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
6.1 ANÁLISIS DEL ARBOLADO	53

6.1.1	<i>Aplicación de las funciones de crecimiento</i>	53
6.1.1.1	Crecimiento en diámetro	53
6.1.1.2	Crecimiento en altura	54
6.1.1.3	Crecimiento en Volumen	55
6.2	APLICACIÓN DEL MÉTODO MEXICANO DE ORDENACIÓN DE MONTES	57
6.2.1	<i>Determinación del ICA en volumen</i>	57
6.2.2	<i>Existencias volumétricas totales</i>	58
6.2.3	<i>Volumen residual o volumen en pie después de la corta</i>	58
6.2.4	<i>Posibilidad volumétrica a extraer</i>	59
6.2.5	<i>Determinación del ciclo de corta</i>	60
6.2.6	<i>Volumen a recuperar al final del ciclo de corta</i>	60
6.3	ANÁLISIS DEL ARBOLADO RESIDUAL.....	61
6.3.1	<i>Comparación de incrementos entre el MMOM y los pronosticados por los modelos de crecimiento</i>	61
6.3.2	<i>Pronóstico de las variables diámetro y altura al final del ciclo de corta</i>	65
6.3.3	<i>Volúmenes al final del ciclo de corta obtenidos con las funciones de crecimiento</i>	68
6.4	COMPARACIÓN DE LOS VOLÚMENES AL FINAL DEL CICLO DE CORTA ENTRE EL MMOM Y LOS PRONOSTICADOS POR LAS FUNCIONES DE CRECIMIENTO	69
7.	CONCLUSIONES	72
8.	BIBLIOGRAFÍA	74
9.	ANEXOS	82

LISTA DE CUADROS

CUADRO 1. Ecuaciones utilizadas para la simulación de datos de árboles.	36
CUADRO 2. Modelos de crecimiento utilizados en la predicción de altura, diámetro y volumen.	41
CUADRO 3. Ecuaciones de incremento corriente anual e incremento medio anual.....	42
CUADRO 4. Ecuaciones de punto de culminación de ICA e IMA.....	43
CUADRO 5. Ecuaciones de incremento corriente anual.....	50
CUADRO 6. Ecuaciones por el método de diferencia algebraica.	51
CUADRO 7. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable altura de los árboles presentes en el predio.	55
CUADRO 8. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable volumen de los árboles presentes en el predio.	56
CUADRO 9. Incremento corriente anual.	57
CUADRO 10. Existencias volumétricas por rodal.	58
CUADRO 11. Volúmenes residuales por rodal.....	59
CUADRO 12. Intensidad de corta y posibilidad volumétrica por rodal.....	59
CUADRO 13. Ciclo de corta por rodal.	60
CUADRO 14. Volumen final al ciclo de corta por rodal.	61
CUADRO 15. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable volumen del arbolado residual.	62
CUADRO 16. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable diámetro normal del arbolado residual.	66
CUADRO 17. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable altura del arbolado residual.	66
CUADRO 18. Ecuación de ajuste para curvas anamórficas de las variables diámetro normal y altura.....	67

CUADRO 19. Comparación de los volúmenes obtenidos al final del ciclo de corta entre los modelos de crecimiento.....	68
CUADRO 20. Comparación de los volúmenes obtenidos al final del ciclo de corta entre el MMOM y los modelos de crecimiento.....	70

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Patrones básicos de disposición espacial.....	5
FIGURA 2. Distribución del bosque simulado en espacio geográfico.....	40
FIGURA 3. Patrón de crecimiento e incremento en diámetro, empleando el modelo Schumacher.....	54
FIGURA 4. Patrón de crecimiento e incremento en altura, empleando modelo Hossfeld.	55
FIGURA 5. Patrón de crecimiento e incremento en volumen, empleando modelo Schumacher.....	56
FIGURA 6. Incremento promedio por edad entre los modelos de crecimiento y el MMOM.....	63
FIGURA 7. Incremento en edades tempranas.....	64
FIGURA 8. Incremento en edades tardías.....	65
FIGURA 9. Estructura de diámetros y alturas por categorías de edad del arbolado presente en el predio.....	69
FIGURA 10. Comparación entre los volúmenes calculados por los modelos de crecimiento y el MMOM.	71

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. Algunos datos generados por las ecuaciones de simulación de datos de árboles.....	82
ANEXO 2. Comportamiento gráfico de los datos utilizados en la investigación.	86
ANEXO 3. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 1.	89
ANEXO 4. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 2.	90
ANEXO 5. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 3.	91
ANEXO 6. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 4.	92
ANEXO 7. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 5.	93
ANEXO 8. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 6.	94
ANEXO 9. Cálculo del incremento por el método Loetsch del rodal 7.	95
ANEXO 12. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Schumacher.	98
ANEXO 13. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Chapman- Richards.....	99
ANEXO 14. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Weibull..	100
ANEXO 15. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Hossfeld..	101
ANEXO 16. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Schumacher.	102
ANEXO 17. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Chapman- Richards.....	103
ANEXO 18. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Weibull.	104
ANEXO 19. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Hossfeld.	105

1. INTRODUCCIÓN.

Uno de los mayores retos en la integración de propuestas de los aprovechamientos forestales y su ejecución, es la conservación de la capacidad renovable de esos ecosistemas, además de mantener sus funciones ecológicas y recreativas, lo cual implica conservar su operatividad funcional y respetar las apreciaciones estéticas. De allí la necesidad histórica de generar métodos de manejo que garanticen lo descrito, permitiendo el aprovechamiento sustentable de tales ecosistemas.

El inicio de la actividad forestal de aprovechamiento industrial en México, estuvo influenciada por métodos europeos; posteriormente, en 1959 se propuso guiar el aprovechamiento forestal sustentable de sus bosques mediante el denominado Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM) (Mendoza y Rodríguez, 1959).

Después surgieron otros métodos, entre los más relevantes, el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) y el Sistema de Conservación y Desarrollo Silvícola (SICODESI). Sin embargo, quizá por su simplicidad u otras causas, el MMOM, ahora denominado Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (SEMARNAP, 1998), continua siendo ampliamente utilizado. Mediante este método en México se aprovechan anualmente 7, 450,908 m³ rollo que corresponden a 78.8% de la producción nacional anual (Carrillo *et al.*, 2005).

En el transcurso de las últimas décadas, han surgido en otros países diversas propuestas para guiar el aprovechamiento forestal. Muchas de las técnicas implicadas por ellas son suficientemente conocidas en México, pero su aplicación ha sido restringida.

Por lo expuesto, el presente trabajo tiene el propósito de integrar algunas de las técnicas referidas en la formulación de un programa de manejo bajo los principios del MMOM, tratando de mejorar las expresiones de los supuestos en que se sustenta. De esta manera, se pretende mejorar un método popularmente empleado, incluyendo técnicas posteriores a su formulación original y pudiendo ser empleado por los prestadores de servicios técnicos forestales en ejercicio, esperando se resuelvan las complejidades que han impedido que otros métodos superen en preferencia al MMOM.

2. OBJETIVOS

El Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM) sigue siendo uno de los procedimientos más relevantes para la elaboración de programas de manejo forestal, sin embargo, a pesar de que en México se conocen otras herramientas metodológicas que pueden mejorar el sustento científico del MMOM, éste sigue siendo aplicado básicamente como fue propuesto originalmente. Por ello, este trabajo se propone el siguiente objetivo:

- Analizar la inclusión de modelos de crecimiento de árboles y masas forestales en los procedimientos de cálculo del volumen al final del ciclo de corta en el Método Mexicano de Ordenación de Montes para la elaboración de programas de manejo forestal.

3. HIPÓTESIS

El crecimiento de los árboles y masas forestales es una de las propiedades básicas de los ecosistemas forestales que permiten hacer un aprovechamiento sustentable, ya que en función de ello son recursos renovables. Para este trabajo se plantea como hipótesis que la inclusión de modelos de crecimiento determinará con mayor efectividad el volumen a recuperar al final del ciclo de corta en el MMOM, como una herramienta para lograr en mayor medida el aprovechamiento sustentable de los bosques de coníferas de México.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1 Patrones espaciales y factores causales de la distribución ecológica de poblaciones

La distribución de los organismos en el espacio tiene una gran influencia sobre la densidad.

La densidad de un rodal está asociada a la ocupación del espacio disponible para crecer; así, existirán rodales en densidad normal, sobredensos y subdensos (Husch, B., y Miller, C., 1993).

Según Corvalán y Hernández (2006), con la intención de determinar con objetividad el nivel de ocupación del espacio, es necesario establecer mediciones y construir índices; los cuales se relacionan con la cantidad de árboles, su tamaño y la distribución espacial que éstos tengan. A la vez, argumentan que el problema de la ocupación espacial es complejo por cuanto existen relaciones inter e intra específicas de difícil interpretación biológica, existiendo relaciones de dependencia en la formación de comunidades vegetacionales y con la capacidad de sitio; también en la formación de las cadenas de dependencia trófica existen interacciones con la fauna, de gran importancia en la gestación y repoblamiento de las comunidades forestales.

Molles (2006) puntualiza que en la distribución espacial de los árboles, existen varios modelos teóricos clásicos en que se definen: Aleatorio, Uniforme y en Grupos (Figura 1)

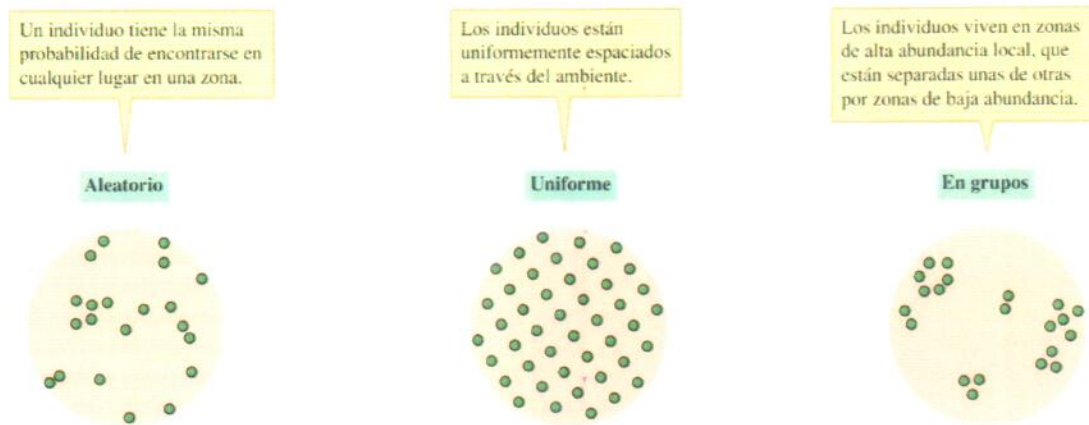


Figura 1. Patrones básicos de disposición espacial. (Molles, 2006)

Para Smith y Smith (2001), los individuos se distribuyen aleatoriamente si la posición de cada uno es independiente de la ubicación de los demás; dentro de un bosque, los árboles de una misma especie pueden distribuirse de manera aleatoria.

En las distribuciones aleatorias se esperan interacciones neutras entre los individuos y entre los individuos y el medio local. Para que la probabilidad de encontrar un individuo sea la misma en todos los puntos del espacio, es necesario que todo este espacio ofrezca las mismas condiciones, lo cual no implica que estas condiciones sean favorables. Asimismo, la presencia de un individuo no debe afectar de ninguna manera la presencia de otro, lo cual no implica que puedan ejercer alguna clase de efecto unidireccional de estas índoles sobre otras especies dentro de una comunidad (Márquez, 2000; Molles, 2006).

La distribución en grupos o agregados, resulta de la respuesta de los organismos a las diferencias en el hábitat, cambios climáticos diarios o estacionales, patrones reproductivos y comportamiento social (Smith y Smith, 2001). La distribución agrupada

indica la presencia de interacciones entre los individuos, o entre los individuos y el medio (Márquez, 2000). Existen muchas causas probables para la formación de un patrón agregado, tales como rebrote vegetativo de plantas luego de la cosecha de los árboles o cuando se producen espacios de luz, lo cual favorecer la instalación de regeneración natural (Barasorda, 1977). Para Molles (2006) en la distribución en grupos los individuos viven en zonas de alta abundancia local, que están separadas unas de otras por zonas de baja abundancia.

En las distribuciones uniformes se esperan interacciones negativas o antagónicas entre los miembros de la población, de manera que existen interacciones hostiles y cada individuo maximiza su supervivencia, minimizándose la hostilidad del conjunto. Esta condición suele no existir en poblaciones naturales, dado que es difícil suponer que de manera natural los recursos se dispongan equidistantes en el espacio; una disposición espacial de este tipo debe estar causada únicamente por factores intrínsecos (Márquez, 2000; Molles, 2006).

En un bosque se da una distribución de tipo uniforme cuando se producen una gran competencia por el espacio de las copas, raíces o el comportamiento agresivo intraespecífico, dado que es éste en el cual la supervivencia se maximiza y las interacciones hostiles se llevan a un mínimo (Márquez, 2000; Smith y Smith, 2001).

De acuerdo a los tipos de distribuciones de los árboles en un bosque mencionados anteriormente, para el presente trabajo, dado que los datos de campo se originaron de un

proceso de simulación, se hizo una distribución aleatoria de dichos datos en un espacio geográfico.

4.2 El manejo integral forestal

El Manejo Forestal Integral es la administración de los recursos forestales tendiente a obtener el rendimiento óptimo y persistente de algunos bienes y servicios, minimizando el deterioro de estos y de sus recursos asociados; implica el aprovechamiento maderable respetando la producción y el potencial de los otros recursos forestales y los asociados a ellos; así como no limita la planeación de la producción de otros bienes y servicios de acuerdo a un entorno y a las necesidades de los dueños y poseedores de los recursos (SEMARNAP-SRN, 1998).

La silvicultura o cultivo del bosque se reconoce como la ciencia mediante la cual se crea y conserva cualquier masa forestal, aprovechándola de un modo continuo con la mayor utilidad posible y teniendo especial cuidado en su regeneración (Carrillo *et al.*, 2005).

4.3 Particularidades del Método Mexicano de Ordenación de Montes

El MMOM es un procedimiento para el cálculo de la cosecha de bosques irregulares de coníferas, ya sea puras o mezcladas con latifoliadas, donde se pretende establecer una extracción durante un cierto periodo de conversión al término del cual, la estructura de los rodales y su comportamiento conduzcan al manejo del rendimiento sostenido (Rodríguez, 1958).

Nació en respuesta a la circular del 9 de octubre de 1944 que sugería la utilización del concepto de interés compuesto para representar el crecimiento de las masas forestales; de esta forma se estableció al incremento corriente anual en volumen ($\text{m}^3/\text{ha}/\text{año}$) como factor de productividad maderable. El MMOM para coníferas, propuso un esquema ordenatorio a través de un ciclo constante para cada serie de ordenación y una intensidad de corta por rodal, que contemplaba (SEMARNAP-SRN, 1998):

- Series de ordenación divididas en áreas de corta anual (tantas como el ciclo).
- Áreas de corta geográficamente secuenciadas.
- Áreas de corta de posibilidades sensiblemente iguales.

Una característica importante del método consistió en hacer variar la intensidad de la corta en cada rodal de conformidad con la magnitud de su porcentaje de incremento corriente; puesto que para un mismo tiempo de recuperación (ciclo de corta) un bosque explotado que ofrece un crecimiento mayor, puede compensar un volumen cortado, también mayor que otro en el que su capacidad de crecimiento sea más baja, y en el que indudablemente el volumen de su corta debe ser también menor a efecto de que ambos durante el ciclo uniforme alcancen con sus crecimientos las existencias que tenían antes de las explotaciones (Rodríguez y Mendoza, 1959).

Los bosques en los que se desarrolló el MMOM eran bosques de coníferas en su mayoría vírgenes y algunos con explotaciones eventuales, por lo que la estructura del bosque mostraba todas las edades representadas en una gradación descendiente, incluyendo

pocos árboles sobremaduros, debido a ello los rodales presentaban estructuras irregulares, pero no balanceadas. Dentro del rodal el arbolado de mayores dimensiones era el componente menos productivo y más sujeto a deterioro dada su condición senil; por sus grandes dimensiones estos árboles ejercían una competencia abrumadora sobre la regeneración y el arbolado juvenil. El diagnóstico de estas masas llevó a la conclusión de que la estructura tanto del bosque como del rodal era anárquica y debía ser ordenada con el fin de que el bosque pudiera eventualmente mantener un rendimiento sostenido (Mendoza, 1993).

4.3.1 Criterios silvícolas del Método Mexicano de Ordenación de Montes

Rodríguez (1958) definió que las cortas debían ser parciales, sin exceder del 50%, pero no inferiores a 35% de remoción del volumen medible en el rodal. Por otro lado, el marcaje del arbolado a derribar debería realizarse de arriba hacia abajo, existiendo un diámetro mínimo cortable de 35 cm, seleccionando primero el arbolado decrepito, defectuoso y que interfiriera en el desarrollo de la masa a dejar en pie. La corta debería reducir la densidad de la masa a un nivel inferior al original y en dejar una densidad residual homogénea. Consideraba que el método de selección permitiría mejorar las condiciones de crecimiento de la masa juvenil y mantener una cubierta permanente del suelo, que fomentaría la regeneración. El sistema silvícola del MMOM considera que la liquidación inmediata y total del rodal virgen presenta un riesgo elevado de pérdida de la productividad del sitio; la eliminación de todo árbol senil podría ser desastrosa para el arbolado juvenil residual; el efecto ecológico de una corta somera sería insignificante, perpetuando el estado desorganizado de la masa; operativamente era necesario que la

cosecha generara una fuente importante y confiable de ingresos para el financiamiento en infraestructura.

Por el año de 1978 el procedimiento fue severamente criticado por degenerar en un procedimiento totalmente selectivo de arbolado maduro con un diámetro mínimo, por lo que se adecuó para que la corta se distribuyera en todas las categorías diamétricas, procurando dejar una estructura residual balanceada, lo que se denominó Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares (MMOBI); que en lugar de ser dirigida libremente por el silvicultor, permita que la gráfica de su distribución de frecuencias se deriva de una meta de estructura normal de la “J” invertida (estructura normal tipo Liocourt), que permite una gráfica de distribución de frecuencias (DGAF, 1984; SEMARNAP-SRN, 1998).

Para rodales multietáneos, la ley de *Liocourt* indica que las frecuencias por clases de diámetro disminuirán con el diámetro en progresión geométrica (García, 1995). La ecuación general que describe dicha ley y que produce una curva exponencial negativa continua es (Daniel *et al.*, 1982):

$$N = ke^{-aD}$$

Donde:

N = Número de árboles por hectárea.

k = Un coeficiente que representa el número de árboles por hectárea cuando el diámetro normal es 0.

e = La constante neperiana= 2.71828183

α = La pendiente de la distribución, que controla la tasa de cambio del número de árboles entre las clases de diámetro sucesivas.

D = Diámetro normal.

En las estructuras de las masas estudiadas por Liocourt, éstas habían sido mantenidas en forma estable por el largo historial de labores de cultivo, de manera que su parecido con la estructura normal no sólo se refería a su situación actual, sino también a que ésta era indefiniblemente sostenible, y por tanto su crecimiento y rendimiento eran prácticamente normales. Dentro del esquema de Liocourt existe una previsión según la cual, categorías diamétricas grandes deben ser eliminadas porque su incremento está por debajo del ritmo que tienen las categorías menores. La aplicación de la corta debía proseguir con las mismas reglas de marcaje de selección, pues la técnica silvícola de selección, según Liocourt, ha sido el medio por el cual se obtiene y se mantiene la estructura normal. Es decir, que no hay una regla numérica de cuántos árboles cortar en cada categoría diamétrica, sino que el marcaje del arbolado que se debe derribar buscará mantener una densidad llena, bien distribuida y tan irregular en cuanto a tamaños de árbol, distribución en el terreno y mezcla de especies, como sea físicamente posible (Mendoza, 1993).

En el MMOM, es común la utilización del método de regulación por volumen, con la desventaja de administrar por la cantidad de productos a extraer y no por la masa que queda en pie que son los productos a extraer en el futuro. La selección del arbolado a extraer se hace en toda la estructura vertical del bosque, cortando árboles de distintas edades y alturas, con la intención de conducir al desarrollo de una masa compuesta de todas las clases de edades (SEMARNAP-SRN, 1998).

Se aplica basado en el cómputo de una posibilidad anual de aprovechamiento, en función del volumen de madera existente por hectárea y el incremento corriente anual ($m^3/ha/año$) y la definición de una intensidad de corta por unidad de superficie, para finalmente determinar el ciclo de corta, el cual considera el tiempo necesario para alcanzar a recuperar el volumen extraído (Carrillo *et al.*, 2005).

4.3.2 Posibilidad aprovechable

Las principales expresiones que calculan los elementos determinantes del método (Rodríguez y Mendoza, 1959), son:

$$PA = \frac{VC}{CC}$$

$$* ER = VP(1 + P)^{CC}$$

* La formulación original fue propuesta como 1.0P que es equivalente a 1+P, y ésta última sigue la nomenclatura más usual en matemáticas. En 1.0P, P representa la tasa de crecimiento expresada en por ciento, siempre que no sea mayor a 9%; así teniendo una tasa de 8.3%, $1+i=1+0.08=1.0P$ por definición equivale a 1.083

$$CC = \frac{\log ER - \log VP}{\log(1 + P)}$$

$$IC = \left(1 - \frac{1}{(1 + P)^c}\right) * 100$$

En donde:

PA = Posibilidad de corta.

ER = Existencias reales antes de la corta, en m^3 .

VP = Volumen en pie después de la explotación, en m^3 .

P = Por ciento de incremento corriente en volumen observado al hacer el inventario de ER .

CC = Ciclo de corta en años.

VC = Volumen de la corta en m^3 , que por definición es igual a $ER-VP$ y por lo mismo $ER-VC$ equivale a VP .

El cálculo de la posibilidad en el MMOM, se determina de tal manera, que al final del ciclo de corta se vuelva a tener el mismo nivel de existencias medibles que se tenía al principio, excepto que, por el efecto silvícola de la corta, se espera que la masa terminal sea más joven, vigorosa, productiva y más cercana a la estructura meta (Mendoza, 1993):

$$VC_{(i,a)} = (VO_{(i,a)} - R_{(i,a)} * VO_{(i,a)}) * (1 + I_{(i,a)})^c \quad (\text{Ecuación 1})$$

Sujeto a:

$$Vc_{(i,a)} = VO_{(i,a)}$$

$$\sum_i R_{(i,a)} * VO_{(i,a)} = \sum_i R_{(i,b)} * VO_{(i,b)}$$

$$0.35 < R_{(i,a)} < 0.50$$

Donde:

$Vc_{(i,a)}$ = Es el volumen inventariable del rodal i en el área de corta a al final del ciclo de corta.

$VO_{(i,a)}$ = Es el volumen inventariable del rodal i en el área de corta a al inicio del ciclo de corta.

$VO_{(i,b)}$ = Es el volumen inventariable del rodal i en el área de corta b al inicio del ciclo de corta.

$R_{(i,a)}$ = Es la intensidad de corta para el rodal i del área de corta a .

$R_{(i,b)}$ = Es la intensidad de corta para el rodal i del área de corta b .

$I_{(i,a)}$ = Es el porcentaje de incremento en volumen medible que tenía el rodal i del área de corta a al iniciar el ciclo de corta.

c = Es la duración deseada del ciclo de corta.

En la ecuación 1 se omite el crecimiento neto de la masa entre el inicio del ciclo de corta y el momento en que un área específica se cosecha. También se asume que la función de producción es exponencial y que la masa de incrementación antes y después de la corta

es constante. Estos tres factores son considerados como márgenes de seguridad a favor del inventario en pie en caso de error en las estimaciones (Mendoza, 1993).

El periodo de conversión durará más de un ciclo de corta, pero no presenta información suficiente para establecer una duración precisa. Se sobreentiende que al término de cada ciclo de corta se revisará la situación del comportamiento, y en caso de encontrarse que las estructuras estén lejanas a la meta, se darán nuevas especificaciones para el ciclo de corta siguiente, en caso contrario, el método se dará por concluido. El periodo de conversión debe concluir a más tardar cuando el material sobremaduro haya sido eliminado y la posibilidad dependa exclusivamente de la incorporación comercial del ciclo (Mendoza, 1993).

Desde el inicio de su aplicación, el MMOM está basado más bien en suposiciones teóricas y expresiones matemáticas, que en resultados experimentales que puedan apoyarse en el método científico, por lo cual no ha dado los resultados esperados en cuanto a las predicciones que establecen las fórmulas y ecuaciones (Mas Porras, 1990).

El MMOM supone que un rodal crece a lo largo de un periodo a una tasa constante sobre el volumen residual, por lo que el volumen de cosecha se calcula con solo estimar el volumen de crecimiento sobre tal periodo; además no existe una estrategia ordenatoria o regulatoria de la cosecha, debido a la ausencia de criterios de calidad de sitio o densidad en la determinación de la cosecha, o bien por la falta de criterios claros en la aplicación de la cosecha (Torres, 1999).

4.3.3 Estimación de incrementos volumétricos

Existen varios métodos conocidos para la estimación de incrementos volumétricos en coníferas, entre los que se encuentran los descritos ampliamente por Zepeda (1983):

- a) Método de Hufnagl.
- b) Método de interpolación o diferencial de Meyer.
- c) Derivación directa a través de ecuaciones volumétricas.
- d) Método de Gevorkiantz-Olsen.
- e) Método de A. A. Hasel, según interpolación de P. F. Efolliot.
- f) Método experimental de Meyer.
- g) Método de diferencias de tarifa o de Loetsch.
- h) Método modificado de diferencias de tarifa.
- i) Método de Hohenadl según interpretación de B. Emrovic.
- j) Métodos de diferencias de diámetros y volúmenes y diferencias de edades y volúmenes.
- k) Método de McCarthy y Robertson.
- l) Método de Recknagel.
- m) Método de Girard, según interpretación de Briegleb y Girard.
- n) Método de Thomson
- o) Método de Chandler.
- p) Método de porciento de incremento de H. A. Meyer.
- q) Método de Hirata.
- r) Método germano-oriental de estimación del incremento.
- s) Método de Bruce y Schumacher.

- t) Método de Borggreve.
- u) Método general del tiempo de paso o del “movimiento” de árboles.
- v) Método de Bastida.
- w) Método del doble tiempo de paso.
- x) Método del área lateral del árbol (área del fuste).
- y) Nomogramas.

Enfocaremos la atención al método de diferencias de tarifa o de Loetsch (Loetsch *et al.*, 1973) por ser el más utilizado en México en la estimación de incrementos volumétricos, este fue dado a conocer en 1953 por su autor e introducido en el país por Villa Salas en 1963 (Zepeda. 1983).

Cuando se introdujo este método de estimación de incrementos al país, se desconocían muchos de los métodos para dicha estimación, además el método de Loetsch era uno de los más consistentes (Zepeda, 1983); Coutiño (1969) concluyó, después de compararlo contra los métodos de análisis troncal y con los de diferencias de edades y volúmenes, que el Método Loetsch es el más preciso, más tarde en 1983, Zepeda concluye que su uso se garantiza por ser uno de los métodos más precisos.

Zepeda (1983), menciona que el Método Loetsch fue tan popular, que la Dirección General del Inventario Nacional Forestal, institucionalizó el uso de este procedimiento al difundirlo ampliamente, que incluso generó tarjetas y programas de cómputo para la captación y procesamiento de datos con la finalidad de obtener los incrementos volumétricos.

4.3.4 Diseño de muestreo

Los diseños de muestreo que se utilizan comúnmente son los sistemas de muestreo sistemático y sistemático aleatorio por sus ventajas prácticas y de costos, pues el MMOM no establece un sistema definido (SEMARNAP-SRN, 1998).

Al ser el rodal la unidad básica de manejo lo ubica automáticamente, en términos de muestreo, en un sistema estratificado, el cual permite disminuir el factor variación en la muestra y asegurar que la toma de información se dé en cada rodal. La intensidad o tamaño de muestra debe responder a la variabilidad de las condiciones del bosque, por lo que se tendrá que realizar un premuestreo para determinar el tamaño óptimo de acuerdo a una confiabilidad estadística predeterminada (SEMARNAP-SRN, 1998).

Las variables básicas en el inventario son: la especie, diámetro normal, altura total, incremento y observaciones. En las observaciones se considera información sobre fauna, flora, posibles impactos ambientales, topografía, sanidad del arbolado, entre otros aspectos que permitan la toma de decisiones en la aplicación de tratamientos, la planeación y programación de las cortas (SEMARNAP-SRN, 1998).

4.3.5 Situación actual del MMOM

Desde su formulación en 1958, como método de manejo de bosques de coníferas, pasando en 1984 por el cambio de nombre a Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares, ha sido severamente criticado por varios trabajos, sin embargo hasta el año 2005 se aprovechaban anualmente 7, 450,908 (m³ rollo) que corresponden al 78.8 por ciento de la producción nacional anual, sin contemplar modificaciones al planteamiento original (Carrillo *et al.*, 2005).

Torres (1999) realizó un análisis del efecto del volumen de corta estimado con el Método Mexicano de Ordenación de Montes (MMOM) sobre la sustentabilidad del bosque. Dedujo que cualquier volumen de cosecha calculado con el MMOM puede ser justificable con sólo variar el ciclo de corta, independientemente de que tal volumen sea sostenible o no.

El volumen de cosecha calculado con el MMOM es sostenible, si la tasa de crecimiento es igual o menor a la tasa esperada de crecimiento en el periodo (ciclo de corta), y si el volumen de cosecha es menor al máximo crecimiento esperado que se pueda lograr en cualquier periodo; dado que la tasa de crecimiento es dependiente de la densidad y de la edad de la masa y considerando que a menor densidad o edad se espera una mayor tasa de crecimiento, es muy probable que en masas jóvenes exista mayor peligro de liquidación que en masas maduras o con mayores densidades (Torres, 1999).

El MMOM puede estimar volúmenes de cosecha casi constantes, siempre y cuando la estimación de crecimiento (exponencial) en el periodo coincida con el crecimiento

esperado en el mismo periodo y que estos crecimientos (netos) sean equivalentes al volumen de cosecha (Torres, 1999).

Sin embargo, no es posible asegurar que una repetida aplicación del MMOM estime volúmenes de cosecha sostenibles; mientras más largo sea el ciclo de corta se corre mayor riesgo de que el crecimiento exponencial refleje volúmenes que no se podrán recobrar; diferencias en las tasas de crecimiento definidas por el MMOM reflejan diferencias en tasas de crecimiento de volúmenes residuales, mas no reflejan diferencias en calidad de sitio como sería el caso de la función de crecimiento logística (Torres, 1999).

4.4 Modelos de crecimiento en el manejo forestal

El crecimiento de un árbol o de una masa forestal está representado por el aumento en sus dimensiones: altura, diámetro, área basal y volumen. Este crecimiento, considerado en un período de tiempo determinado se denomina incremento, el cual representa un aumento en la cantidad de tejido acumulado de floema y xilema en forma de corteza y madera respectivamente (Klepac, 1983).

Los modelos matemáticos son una de las herramientas analíticas más socorridas en la actualidad para la generación de conocimientos en el área del crecimiento y reproducción de masas forestales sujetas a un régimen de cultivo (Mendoza, 1983).

Los modelos para estimar el incremento y rendimiento de rodales son herramientas, que dependiendo de su tipo, generalidad, complejidad, realismo, precisión, exactitud,

confiabilidad, validez y elasticidad producen información útil sobre regímenes silvícolas que procuren estructuras diamétricas residuales de características deseables, la frecuencia de aclareos más conveniente, la distribución de productos más provechosa, los criterios de madurez entre otras prácticas (Zepeda, 1990).

Para modelar el crecimiento de árboles y masas forestales, en la actualidad se consideran dos métodos de construcción: los modelos de proceso y los empíricos. Los primeros simulan los procesos biológicos mediante los cuales se elabora la biomasa del organismo, y los segundos, basados en la experiencia. El crecimiento es considerado como la respuesta de un sistema complejo, sobre el que actúa un gran número de variables, pero en pocas de ellas, frecuentemente sólo la edad se considera para el modelaje (Ramírez y Zepeda, 1994).

4.4.1 Generalidades sobre modelos de crecimiento

Un modelo de crecimiento se considera efectivo si está expresado en función de variables predictoras fáciles de medir, con un coeficiente de determinación relativamente alto, por arriba de 0.8. Mientras menor número de variables predictoras estén implicadas en un modelo es más apropiado para ser usado; con muchas variables predictoras, el modelo se vuelve muy sensible a las relaciones entre ellas, especialmente, si algunas de esas variables están altamente correlacionadas (Alder, 1980).

Mendoza (1983) discutió sobre la dificultad en los intentos que se habían realizado para clasificar a los modelos, llegando a la conclusión que se debía a la versatilidad de la técnica de modelaje, tanto en elementos matemáticos de construcción como en

estructura interna, complejidad, realismo y características de uso de los modelos; por lo que expuso una clasificación con base a objetivos, los cuales se exponen a continuación:

- a) Compiladores: Estos modelos permiten el manejo rápido y confiable de cantidades masivas de información de campo, buscando conjuntar los resultados experimentales de un cierto tema en una sola teoría, representada en lenguaje matemático.
- b) Táctico: El modelo pretende ilustrar conceptos teóricos en una forma elegante, clara y condensada.
- c) Estratégicos: El modelo actúa como un mecanismo sistemático de deducciones lógicas que en aproximaciones sucesivas va eliminando de los datos el ruido y haciendo resaltar los patrones básicos en la dinámica del fenómeno.
- d) Simuladores: Su propósito es reproducir tanto el funcionamiento de los elementos internos del fenómeno de interés, como su dinámica global.
- e) Predictores: El interés básico radica en predecir el desarrollo de un fenómeno o su comportamiento en condiciones distintas de aquellas que sirvieron de base para su construcción.
- f) Optimizadores: Su función es detectar estados específicos del objetivo de estudio, según algún criterio de optimización.

Entre los objetivos de los modelos de crecimiento en el manejo forestal están, describir la tasa de crecimiento para las especies y sitios más importantes de las unidades de manejo; incorporar la experiencia acumulada sobre efectos de tratamientos silvícolas en

masas forestales para prever las tasas de producción bajo sistemas alternativos de manejo; predecir cambios en la fertilidad del sitio o en el potencial de producción; así como guía en la toma de decisiones de los silvicultores (Adlar, 1983).

De acuerdo con Zeide (1993), el crecimiento resulta de la interacción de dos fuerzas opositoras: un componente positivo manifestado por la expansión de un organismo que tiende hacia la multiplicación exponencial, este componente está asociado con el metabolismo constructivo o anabolismo. Un componente opositor que representa las restricciones impuestas por factores externos como la competencia por recursos, respiración, estrés, es decir el catabolismo.

4.4.2 Clasificación de los modelos de crecimiento

El crecimiento y rendimiento de un bosque, puede ser modelado a tres niveles básicos (Clutter *et al.*, 1983; Zepeda, 1990; Davis *et al.*, 2001):

1. Con modelos de totalidad del rodal.
 - a. Modelos de densidad libre.
 - i. Tablas de rendimiento normal.
 - ii. Tablas de rendimiento empíricas.
 - b. Modelos de densidad variable.
 - i. Predicción del volumen actual.
 1. Modelos explícitos.
 2. Modelos implícitos (distribuciones diamétricas).
 - ii. Predicción del rendimiento y volumen futuro.

1. Modelos explícitos.
 - a. Predicción directa del crecimiento.
 - b. Predicción de la densidad del rodal.
 2. Modelos implícitos (distribuciones diamétricas).
2. Con modelos de distribuciones por clases diamétricas.
 - a. Tablas empíricas de proyección de estructuras.
 - b. Modelos de crecimiento de clases diamétricas.
 3. Con modelos para árboles individuales.
 - a. Dependiente de la distancia.
 - b. Independiente de la distancia.

Para la predicción de los crecimientos, en este proyecto de investigación, se usaron los modelos de totalidad de rodal.

4.4.2.1 Modelos de totalidad de rodal

Los modelos de totalidad del rodal, se caracterizan porque la solución de las ecuaciones que comprende el sistema, proporcionan la estimación del volumen por unidad de área y la predicción puede ser para estimar el rendimiento actual, el cual no considera la densidad de la proyección futura o rendimiento futuro (Klepac, 1983).

Al ser el rodal la unidad primaria de modelaje, no se requiere información espacial de cada árbol, ni de sus atributos individuales, sino de los atributos globales o promedios del rodal (Zepeda, 1990; Davis *et al.*, 2001).

BIBLIOTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

4.4.3 Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales

El crecimiento de los árboles o masas forestales es predicho mediante curvas que relacionan el tiempo con su crecimiento o incremento.

Una curva de crecimiento es una representación gráfica de tamaños acumulados, ésta representa la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el período de observación. Así, el crecimiento puede ser considerado como la suma de los incrementos anuales, y el incremento, como la tasa de cambio de ese crecimiento (Zeide, 1993).

Las variables dasométricas como la altura, el diámetro normal o el volumen, como funciones de la edad del árbol, muestra una relación que sigue un patrón que puede ser representada por una curva logística, que a su vez es descrita por una ecuación (Ramírez y Zepeda, 1994).

Esta curva de crecimiento típica toma generalmente una forma sigmoide, empieza con un crecimiento inicial lento, seguido de una fase de crecimiento acelerada; otra etapa en que ese crecimiento se desacelera gradualmente, hasta que el organismo deja de crecer, permanece de un mismo tamaño durante algún tiempo y finalmente muere, determinado por la naturaleza genética del organismo y sus limitaciones ambientales (Klepac, 1983; Ramírez y Zepeda, 1994).

A la primera derivada de la curva de crecimiento se le conoce como incremento corriente y, a la razón entre la ordenada y la abscisa de la curva de crecimiento se le llama incremento medio (Ramírez y Zepeda, 1994).

La curva de incremento medio es unimodal, semejante a la curva de incremento corriente, pero sube más lentamente y del mismo modo decrece (Prodan, 1968; citado por Cumplido, 2002)

La curva del incremento corriente inicia en el valor de cero, aumenta lentamente al principio y después rápidamente. Después de un máximo, el incremento disminuye, para posteriormente acercarse asintóticamente a cero. La culminación del incremento en esta curva coincide con el punto de inflexión de la curva de crecimiento (Klepac, 1983); mientras que la culminación del incremento medio ocurre siempre después y corresponde al punto donde la tangente del ángulo máximo trazado desde el origen de los ejes coordenados toca a la curva de crecimiento; el incremento corriente es igual al incremento medio cuando este último culmina (Ramírez y Zepeda, 1994).

El rendimiento, por otra parte, se refiere a la cantidad total de madera susceptible de ser cosechada (o realmente cosechada) en un tiempo y en un sitio dado. A diferencia de la producción, que representa toda la madera inventariable producida en un sitio (sea bruta o neta), el rendimiento es la cantidad total efectiva de producto útil, por ello, el rendimiento de un rodal, puede ser menor o igual que su producción (Zeide, 1993).

Las mejores variables independientes para predecir el crecimiento, ya sea en volumen, altura, diámetro o área basal, deben ser seleccionadas mediante un análisis estadístico objetivo, a través del cual se determine que estas variables estén relacionadas individualmente y en forma conjunta con la variable dependiente de interés (Klepac, 1983).

4.4.4 Modelos de interés para la predicción del crecimiento e incremento de masas forestales

Para el presente trabajo se emplean y evalúan cuatro modelos de crecimiento, algunos ampliamente utilizados en silvicultura: Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld. A continuación se hace una breve descripción de los mismos.

En 1934 Von Bertalanffy formuló la hipótesis que expresa la tasa de crecimiento en volumen de un organismo como la diferencia entre la tasa anabólica y la tasa catabólica. La tasa anabólica es proporcional al área superficial del organismo, mientras que la tasa catabólica es proporcional al volumen de la biomasa (Zamudio y Ayerde, 1997). La hipótesis puede expresarse matemáticamente como:

$$\frac{dV}{dt} = \eta V^{\frac{2}{3}} - \gamma V$$

Donde:

η = Parámetro de la tasa anabólica del crecimiento.

γ = Parámetro de la tasa catabólica del crecimiento.

V = Volumen de la biomasa.

$\frac{2}{3}$ = Constante alométrica.

Al integrar la ecuación anterior con el auxilio de la ecuación de Bernoulli, para la integración de ecuaciones diferenciales, se llega a la siguiente ecuación general (Zamudio y Ayerde, 1997):

$$y = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 t}\right)^3$$

Donde:

y = Variable de estudio.

β_0 = Parámetro del valor asintótico.

β_1 = Parámetro de la tasa de crecimiento.

t = Edad.

4.4.4.1 Modelo Schumacher

Clutter *et al.* (1983), mencionan que el uso del logaritmo en algunas variables dependientes del rodal y el recíproco de la edad como variables predictoras en los modelos de crecimiento, se les atribuye inicialmente a MacKinney *et al.* (1937) y Schumacher (1939).

Inicialmente se desarrolló para relacionar el volumen con la edad. Supone que el crecimiento porcentual varía inversamente con la edad, es decir, a medida que aumenta la edad disminuye la tasa de crecimiento (Schumacher, 1939).

$$\frac{dy}{d\left(\frac{1}{t}\right)} = ky$$

Donde:

y = Variable de estudio.

k = Constante de proporcionalidad de la tasa de crecimiento.

t = Edad.

Al integrar la ecuación anterior, se llega a la siguiente expresión (Zamudio y Ayerde, 1997).

$$y = \beta_0 e^{-\beta_1 \frac{1}{t}}$$

Donde:

y = Variable de estudio.

β_0 = Parámetro del valor asintótico.

β_1 = Parámetro de la tasa de crecimiento.

t = Edad.

Schumacher (1939) señala que la curva de rendimiento volumétrico de un rodal coetáneo presenta ciertas características en común con otras curvas de crecimiento entre las cuales menciona:

1. La curva de rendimiento vale cero en el intercepto y tiene un valor máximo finito a edad avanzada justamente antes de que el rodal empiece a decrecer, de allí en adelante, el rodal pierde su uniformidad.
2. La curva muestra una tasa declinante del porcentaje de incremento.
3. La pendiente de la curva de crecimiento aumenta al inicio de la vida y decrece en los últimos años.

4.4.4.2 Modelo de Chapman-Richards

El modelo Chapman-Richards fue usado por primera vez en la predicción de crecimiento de masas forestales por Pienaar y Turnbull (1973).

Richards en 1959 y Chapman en 1961, al realizar estudios en plantas y peces, reconocieron que la tasa alométrica de $2/3$ que estableció Von Bertalanffy fue bastante restringida para aplicarse a varias formas de vida; por lo que sugirieron que la constante alométrica sea un valor indefinido y propusieron un modelo generalizado, derivado de la ecuación de Von Bertalanffy, que tuviera aplicaciones en estudios botánicos empíricos (Pienaar y Turnbull, 1973; Zamudio y Ayerde, 1997).

El modelo es derivado de consideraciones biológicas básicas y ha demostrado mucha flexibilidad en su aplicación. La formulación del modelo conceptualiza el crecimiento de un organismo o población como el resultado de procesos anabólicos y catabólicos. La tasa anabólica se asume es proporcional al tamaño del organismo o población, elevado a una potencia o exponente, mientras la tasa de catabolismo es directamente proporcional al tamaño (Clutter *et al.*, 1983). La relación es expresada como:

$$\frac{dV}{dt} = \eta V^m - \gamma V$$

Donde:

η = Parámetro de la tasa anabólica del crecimiento.

γ = Parámetro de la tasa catabólica del crecimiento.

V = Volumen de la biomasa.

m = Parámetro de alometría.

t = Edad.

Al integrar la ecuación anterior con el auxilio de la ecuación de Bernoulli, para la integración de ecuaciones diferenciales, se llega a la siguiente ecuación (Zamudio y Ayerde, 1997):

$$y = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 t}\right)^{\beta_2}$$

y = Variable de estudio.

β_0 = Parámetro del valor asintótico.

β_1 = Parámetro de la tasa de crecimiento.

β_2 = Parámetro de forma.

t = Edad.

Para Zamudio y Ayerde (1997) la ventaja de utilizar la ecuación Chapman-Richards es su flexibilidad, esta ecuación es valorada por su exactitud y es usada frecuentemente en estudios de crecimiento de árboles y rodales.

4.4.4.3 Modelo Weibull

Ayerde (1996) menciona que la función Weibull fue desarrollada en 1951 y había sido aplicada inicialmente en estudios de probabilidad en resistencia de materiales. En silvicultura puede ser fácilmente modificada para formular una función de crecimiento que genere una amplia variedad de curvas de crecimiento sigmoidales.

El modelo Weibull es altamente flexible, es capaz de asumir virtualmente todo aumento monótonico de la forma del crecimiento sigmoidal que se encuentra en el universo biológico, es poseedor de algunas características que son de particular interés en la construcción teórica de modelos de crecimiento (Zamudio y Ayerde, 1997).

$$y = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 t^{\beta_2}} \right)$$

Donde:

y = Variable de estudio.

β_0 = Parámetro del valor asintótico.

β_1 = Parámetro de la tasa de crecimiento.

β_2 = Parámetro de forma.

t = Edad.

Para muchas situaciones en los cuales los datos que no pueden ser ajustados por un modelo exponencial, el modelo Weibull puede usarse; las inferencias relacionadas a dos parámetros desconocidos es más difícil hacerlas con el modelo exponencial que con Weibull (Shapiro y Gross, 1981).

4.4.4.4 Modelo Hossfeld

El modelo Hossfeld para describir el crecimiento, es regularmente usado en las investigaciones forestales, para determinar los patrones de crecimiento de los árboles (Zeide, 1993).

Esta función se basa en el supuesto que la forma general de crecimiento es dependiente del tamaño y muestra un óptimo en el tamaño intermedio. El uso del modelo Hossfeld permite describir los patrones de crecimiento de un árbol individual y determinar a qué diámetro el crecimiento es más alto (Brienen y Zuidema, 2003).

La ecuación del modelo Hossfeld es como a continuación se describe (Zepeda 1990):

$$y = \frac{t^2}{\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2}$$

Donde:

y = Variable de estudio.

β_0 = Parámetro inicial.

β_1 = Parámetro de la tasa de crecimiento.

t = Edad.

Para obtener el valor asintótico de la función:

$$y = \frac{t^2}{\beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2}$$

$$\text{Si } t \rightarrow \infty \quad y = \frac{1}{0 + 0 + \beta_2}$$

Entonces el valor asintótico es:

$$\frac{1}{\beta_2}$$

5. METODOLOGÍA

5.1 Base de datos

Los datos utilizados en el presente estudio se generaron mediante un método propuesto por Ramírez (2006)* que se basa en ecuaciones de predicción que incluyen procesos de simulación para generar aleatoriamente datos que simulan el comportamiento individual del arbolado en un bosque; además este método genera estructuras de arbolado representativas de diferentes categorías diamétricas y de alturas, característica importante para este proyecto de investigación.

La base inicial de la simulación es la ecuación que genera el diámetro, la cual parte de la distribución lognormal, con distribución uniforme (entre 0 y 1) y funciona a través del siguiente procedimiento: se toma la función de distribución acumulada de la distribución lognormal, y se construye su inversa, posteriormente se simulan valores de probabilidad uniformes entre 0 y 1, y a esos valores se aplica la función inversa.

El simulador utiliza las variables y parámetros que se ilustran en el Cuadro 1, también se observa que el volumen del arbolado simulado se genera a partir de las variables diámetro y altura con una ecuación de volumen con corteza de *Pinus pseudostrobus*, generada por la antigua Dirección General del Inventario Nacional Forestal en el año de 1976 para el estado de Chiapas.

*Dr. Hugo Ramírez Maldonado, Profesor-Investigador DICIFO-UACH. Comunicación personal

La razón por la que se utilizó esta función de volumen para la cubicación del arbolado procedente de la simulación, fue porque *Pinus pseudostrobus* es un árbol de rápido crecimiento además de que la ecuación de predicción se adapta a las características del arbolado generado.

Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para la simulación de datos de árboles.

Variable	Ecuación	Parámetros
Diámetro normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$	$\mu = 2.895$ $\sigma = 0.6$ x = Número aleatorio de distribución uniforme.
Diámetro de copa	Donde: $Dc = \beta_0 + \beta_1 \ln Dn + E$ $E = (x - 0.5) * (0.20 * \beta_1 \ln Dn)$	$\beta_0 = -4.85$ $\beta_1 = 3.01$ x = Número aleatorio de distribución uniforme.
Altura total	Donde: $h = \beta_0 + \beta_1 \ln Dn + E$ $E = (x - 0.5) * (0.20 * \beta_1 \ln Dn)$	$\beta_0 = -18.7$ $\beta_1 = 11.013$ x = Número aleatorio de distribución uniforme.
Altura de fuste limpio	Donde: $hf = \min(h - (\beta_0 + \beta_1 \ln h) + E, h * 0.8)$ $E = (x - 0.6) * (0.40 * 0.42 \ln h)$	$\beta_0 = -7.44$ $\beta_1 = 6.45$ x = Número aleatorio de distribución uniforme.
Altura comercial	Si Dn mayor o igual a 10 Donde: $hc = \beta_0 + \beta_1 h + E$ $E = (x - 0.7) * (0.30 * 1 * h)$	$\beta_0 = -4.73$ $\beta_1 = 1.028$ x = Número aleatorio de distribución uniforme.
Donde: E = Error		

Continuación Cuadro 1...

	Paso 1.	$Dn_{clasif} = Dn + ((x - 0.5) * 3)$	x = Número aleatorio de distribución uniforme.
	Paso 2.	Si $Dn_{clasif} = 15$ $Vigor = 1$ Si $15 < Dn_{clasif} \leq 25$ $Vigor = 2$ Si $25 < Dn_{clasif} \leq 50$ $Vigor = 3$ Si $Dn_{clasif} > 50$ $Vigor = 4$	
	Paso 3.	$P_{copa} = \frac{1 - hf}{h}$	
	Paso 4.	Si $Vigor = 1$ Si $p_{copa} > 0.7$ $Vigor_ch = "A"$ Si $0.5 < p_{copa} \leq 0.7$ $Vigor_ch = "B"$ Si $0.3 < p_{copa} \leq 0.5$ $Vigor_ch = "C"$ Si $p_{copa} \leq 0.3$ $Vigor_ch = "D"$	
Vigor_Vigor	Paso 5.	Si $Vigor = 2$ Si $p_{copa} > 0.7$ $Vigor_med = "A"$ Si $0.5 < p_{copa} \leq 0.7$ $Vigor_med = "B"$ Si $0.2 \leq p_{copa} \leq 0.5$ $Vigor_med = "C"$ Si $p_{copa} < 0.2$ $Vigor_med = "D"$	
	Paso 6.	Si $Vigor = 3$ o $Vigor = 4$ Si $p_{copa} > 0.55$ $Vigor_gde = "A"$ Si $0.5 < p_{copa} \leq 0.55$ $Vigor_gde = "B"$ Si $0 < p_{copa} \leq 0.5$ $Vigor_gde = "C"$ Si $p_{copa} \leq 0$ $Vigor_gde = "D"$	
	Paso 7.	$Vigor_vig = Vigor \parallel Vigor_ch \parallel Vigor_med \parallel Vigor_gde$	
Edad		$Edad = \frac{\beta_0}{\beta_1 - \ln Dn}$	$\beta_0 = 25.293179$ $\beta_1 = 4.38794812$
Volumen		$Vol = e^{(-9.58801453 + 1.75592913 \log(Dn) + 1.07004135 \log(h))}$	

Los modelos ilustrados en el Cuadro 1 se introdujeron en una hoja de cálculo electrónica del programa Office Excel versión 2003 y con el propósito de observar su comportamiento, se generaron diez bases con 60,000 datos cada una, las cuales fueron

analizadas mediante histogramas que dejaron ver gráficamente la distribución de las diferentes variables dasométricas por categorías de edad.

Lo anterior corroboró las similitudes entre las bases de datos, como consecuencia, se eligió una al azar, la cual sirvió de plataforma para el proyecto y la obtención de resultados que del mismo emanaron.

La base se ajustó a 45,000 datos con el propósito de manipular 300 árboles por hectárea en una superficie física de 150 hectáreas, además el arbolado se conformó de categorías de diámetro entre 10 y 70 cm.

Hubo la necesidad de distribuir en un espacio físico los datos generados y una vez indagado los diferentes tipos de distribución ecológica de las poblaciones: sistemática, agrupada y aleatoria, además de considerar el comportamiento del arbolado en un bosque real, se decidió que la distribución de la información sería aleatoria.

Con el propósito de lograr lo mencionado en el párrafo anterior, se propuso distribuir los 45,000 árboles en una superficie de 1, 500,000 m² (300 árboles/hectárea). A cada árbol se le asignó una coordenada X y Y de manera aleatoria. Posteriormente estos datos se exportaron al programa de Arc View versión 3.3, para ubicarlos espacialmente.

Introducida la coordenada (X, Y) a cada uno de los datos, se guardó el archivo en formato *.dbf para ser leídos en el programa Arc View, que una vez reconocidos, se

transformaron en formato Shape file pudiéndose de esta manera manipular la información en un espacio geográfico.

Una vez visualizada en pantalla la distribución de los datos, se procedió a fraccionar la superficie, generando con ello 8 rodales y de esta manera analizar la información como comúnmente se hace en los programas de manejo forestal.

La superficie de cada rodal fue determinada con las herramientas que cuenta el programa Arc View; además, mediante tablas de atributos generadas por el mismo programa, se pudo etiquetar cada árbol en cada rodal con sus respectivas superficies.

Posteriormente se procedió a realizar un muestreo sistemático en toda la superficie, colocando puntos a cada 100 m, a continuación en cada uno de los puntos, con una herramienta denominada Buffer del mismo programa, se realizaron círculos de 17.84 m de radio, con la finalidad de tener sitios circulares de 1000 m², que es el tamaño común de los sitios de muestreo utilizados en los inventarios forestales. La información contenida en los sitios sirvieron de base, junto con información proveniente de campo de los incrementos promedios de *Pinus pseudostrobus*, para hacer el cálculo del incremento en el predio.

En la Figura 2, se ilustra la distribución final del arbolado en el espacio geográfico (predio), así como la rodalización, los sitios circulares y la superficie de cada rodal.



Figura 2. Distribución del bosque simulado en espacio geográfico.

5.1.1 Análisis del comportamiento del arbolado en el predio

Para evaluar el comportamiento del arbolado y sobre todo en diámetro y altura, se emplearon cuatro modelos para estimar el crecimiento de los árboles, además de sus respectivas curvas de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA). Los modelos utilizados para este propósito fueron Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld (Cuadro 2).

Para el ajuste del modelo predictor del crecimiento en diámetro sólo se utilizó el modelo generalizado de Schumacher para ajustar el comportamiento de los datos.

El crecimiento en altura dominante se analiza mediante expresiones de crecimiento derivadas de ecuaciones diferenciales que describen el cambio en la biomasa total

acumulada en el tiempo (Pienaar y Turnbull, 1973; Clutter *et al.*, 1983; Davis *et al.*, 2001). Para el caso de modelar el crecimiento en altura fue crucial una adecuada selección de la expresión de crecimiento. En especial los modelos de Chapman-Richards y Weibull fueron seleccionados por su base biológica, flexibilidad y exactitud (Zeide, 1993).

Con el apoyo del paquete estadístico SAS utilizando el procedimiento de regresión no lineal (Non Linear Regression o NLIN) mediante el método Marquart, se estimaron los parámetros de cada modelo y se obtuvieron los criterios de bondad de ajuste. El modelo seleccionado fue aquel que presentó menor SCE, además de rectificar el diagrama de dispersión con el ajuste del modelo (Alder, 1980; Vanclay, 1994).

Cuadro 2. Modelos de crecimiento utilizados en la predicción de altura, diámetro y volumen.

Modelo	Ecuación	Linealizado
*Schumacher	$y = \beta_0 * e^{-\beta_1 \frac{1}{Edad}}$	$\ln y = \ln \beta_0 - \frac{\beta_1}{Edad}$
*Chapman-Richards	$y = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 * Edad}\right)^{\beta_2}$	No es linealizable
*Weibull	$y = \beta_0 \left(1 - e^{-\beta_1 * Edad^{\beta_2}}\right)$	No es linealizable
**Hossfeld	$y = \frac{Edad^2}{\beta_0 + \beta_1 Edad + \beta_2 Edad^2}$	No es linealizable

*Fuente: Ayerde, 1996. **Fuente: Zepeda, 1990.

Donde y = Función integral; $\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión.

Siguiendo la metodología utilizada por Monárrez y Ramírez (2003), la ecuación que generó la curva de crecimiento, es la función integral, de tal manera que la curva del incremento corriente anual (ICA), se obtuvo tomando la primera derivada de las

funciones originales con respecto a la edad; para generar la curva del IMA, se dividió la ecuación integral entre la edad (Cuadro 3).

El punto de culminación del ICA se identificó tomando la segunda derivada de la función original con respecto a la edad, igualando a cero y despejando la edad (Monárrez y Ramírez, 2003). El punto de culminación del IMA se obtuvo tomando la primera derivada de la función IMA con respecto a la edad, igualando a cero y despejando la edad (Cuadro 4).

Cuadro 3. Ecuaciones de Incremento Corriente Anual e Incremento Medio Anual.

Modelo	ICA	IMA
*Schumacher	$ICA = \frac{\beta_1}{E^2} y$	$IMA = \frac{y}{E}$
*Weibull	$ICA = \beta_1 \beta_2 E^{\beta_2 - 1} (\beta_0 - y)$	$IMA = \frac{y}{E}$
*Chapman-Richards	$ICA = \frac{\beta_1 \beta_2 e^{-\beta_1 E}}{(1 - e^{-\beta_1 E})} y$	$IMA = \frac{y}{E}$
Hossfeld	$ICA = \frac{\beta_1 E^2 + 2\beta_0 E}{(\beta_0 + \beta_1 E + \beta_2 E^2)^2}$	$IMA = \frac{y}{E}$

*Fuente: Ayerde, 1996.

Donde: ICA = Incremento Corriente Anual; IMA = Incremento medio anual; E = Edad (años);

$\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión.

Cuadro 4. Ecuaciones de Punto de Culminación de ICA e IMA.

Modelo	Culminación ICA	Culminación IMA
*Schumacher	$PCICA = \frac{\beta_1}{2}$	$PCIMA = \beta_1$
Weibull	$PCICA = \left(\frac{\beta_2 - 1}{\beta_1 \beta_2} \right)^{\frac{1}{\beta_2}}$	$PCIMA > PCICA$ tal que $** e^{\beta_1 PCIMA^{\beta_2}} = 1 + \beta_1 \beta_2 PCIMA^{\beta_2}$
Chapman-Richards	$PCICA = \frac{\ln \beta_2}{\beta_1}$	$** \frac{e^{\beta_1 PCIMA} - 1}{PCIMA} = \beta_1 \beta_2$
Hossfeld	$PCICA < PCIMA$ tal que $** 2\beta_1 \beta_2 PCICA^3 + 6\beta_0 \beta_2 PCICA^2 - 2\beta_0^2 = 0$	$PCIMA = \sqrt{\frac{\beta_0}{\beta_2}}$

*Fuente: Ayerde, 1996.

Donde: $PCICA$ = Punto de culminación de incremento corriente anual; E = Edad (años);

$PCIMA$ = Punto de culminación de incremento medio anual; $\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión.

**La solución se determina por métodos numéricos (encontrando raíces a la ecuación).

5.2 Aplicación del Método Mexicano de Ordenación de Montes

5.2.1 Cálculo del incremento en volumen por el método de Loetsch

Para el cálculo del incremento en volumen se utilizó el método de Loetsch, aplicado a cada rodal con la intención de recabar información parcial de cada clase diamétrica.

La secuela de cálculo que se utilizó fue la descrita por Carrillo (1998).

1. Promedio de muestras de incremento obtenidas con el taladro de Pressler.

Los incrementos utilizados para este primer paso, se obtuvieron a partir de promedios de incrementos de datos reales de *Pinus pseudostrobus*.

2. Registro de las variables dasométricas altura y diámetro normal.
3. Determinación del volumen individual.
4. Determinación del incremento corriente anual individual en diámetro; midiendo el ancho de los últimos 10 anillos en cada muestra.

Con los datos anteriores se procedió a calcular el incremento en volumen por hectárea para cada categoría diamétrica, así como el incremento total en volumen para el rodal. Los cálculos fueron como a continuación se describe (los números de las columnas corresponden a cada uno de los cuadros referidos a los Anexos 3 al 10):

Columna 1: Corresponde a las clases diamétricas.

Columna 2: El número de árboles promedio presentes en cada rodal para cada clase diamétrica por hectárea.

Columna 3: El volumen promedio en cada clase diamétrica.

Columna 4: Se calcularon las diferencias de volumen entre las clases diamétricas sucesivas.

Columna 5: Para cada clase diamétrica se calculó el volumen de un centímetro de diámetro, con la siguiente ecuación:

$$X_n = \frac{D_1 + D_2}{10}$$

Donde:

X_n = Volumen de un centímetro de diámetro en la clase diamétrica “n”.

D_1 = Diferencia de volumen de la clase diamétrica anterior a la considerada.

D_2 = Diferencia de volumen de la clase diamétrica posterior a la considerada.

Columna 6: Se anotó para cada clase diamétrica la media aritmética de los valores individuales del incremento anual en diámetro.

Columna 7: Se calculó el incremento anual en volumen para cada clase diamétrica, multiplicando el valor de la columna 6 por el valor de la columna 5.

Columna 8: El incremento de volumen en porcentaje se obtiene para cada clase diamétrica, multiplicando por 100 el cociente que resulta al dividir el valor de la columna 7 entre el valor de la columna 3.

Columna 9: El volumen por hectárea para cada clase diamétrica, se obtiene multiplicando el número de árboles por hectárea por el volumen promedio (columna 2 por columna 3).

Columna 10. El incremento corriente anual en volumen por hectárea, para cada clase diamétrica, se obtiene multiplicando el número de árboles por hectárea por el incremento anual en volumen (columna 2 por el valor de la columna 7).

Finalmente se obtuvo el incremento corriente anual en volumen por hectárea, sumando los resultados parciales de cada clase diamétrica.

5.2.2 Cálculos básicos en el MMOM

El elemento que en el MMOM avala la persistencia del aprovechamiento maderable es el incremento anual, que es el incremento corriente de la masa dejada en pie o residual después de una intervención, conforme a la ley del interés compuesto (SEMARNAP, 1998).

El cálculo del volumen de corta se hizo por rodal. Con la ventaja de conocer el volumen individual de cada uno de los árboles presentes en los rodales, sólo se sumaron dichos volúmenes, lo que generó las *Existencias reales totales* o *Volumen total árbol*, así mismo al dividir este último concepto entre la superficie del rodal dio como resultado las existencias reales por hectárea (ER/ha).

Posteriormente se aplicó la eliminación aleatoria de 30%, equivalente a la **Intensidad de corta**, de los árboles existentes en cada rodal, lo que generó el *Volumen residual* o *Volumen en pie después de la corta*. Así también el volumen residual por hectárea (VP/ha) se obtuvo al dividir el volumen residual del rodal entre la superficie del mismo.

De otra forma, la Intensidad de corta, se determina mediante la siguiente expresión:

$$IC = \left(1 - \frac{1}{(1+i)^{cc}} \right) * 100$$

Donde:

i = Incremento en volumen como proporción del volumen residual durante el

ciclo de corta.

$$i = \frac{ICA \text{ m}^3 / ha}{ER \text{ m}^3 / ha}$$

CC = Ciclo de corta (años).

La **Posibilidad** o volumen a extraer por rodal, se logró al aplicar la siguiente ecuación:

$$Posibilidad \text{ del rodal} = ER * \left(\frac{IC}{100} \right)$$

Donde:

ER = Existencias reales totales.

IC = Intensidad de corta en porciento.

La posibilidad a extraer en m^3 por hectárea es el cociente de dividir la posibilidad del rodal entre la superficie del mismo.

El *Incremento Corriente Anual* en porciento, se obtuvo al dividir el incremento corriente anual en m^3 (logrado mediante el método de Loetsch) entre las existencias reales por hectárea y multiplicado por cien.

Posteriormente se procedió a determinar el ciclo de corta, que es el tiempo en que tarda un bosque en recuperar el volumen extraído, para cada rodal con la expresión siguiente:

$$CC = \frac{\log ER - \log VP}{\log(1 + i)}$$

Donde:

ER = Existencias reales (m^3/ha).

VP = Volumen en pie después de la corta o volumen residual (m^3/ha).

i = Incremento en volumen como proporción del VP durante el ciclo de corta.

CC = Ciclo de corta (años).

Una vez establecido el ciclo de corta, el paso siguiente consistió en determinar el volumen que será recuperado al final del ciclo de corta. El MMOM basa el cálculo del volumen de cosecha en la fórmula del interés compuesto. De tal manera que el volumen que se puede obtener al final del ciclo de corta, equivalente a las ER , no es más que el volumen en pie después de la corta (VP) más el volumen producto del crecimiento de la

masa forestal, mismo que se deduce crece a una tasa constante y compuesta (CC) sobre el volumen en pie y durante el periodo $0 \rightarrow f$. La estimación es como sigue:

$$ER = VP(1 + i)^{CC}$$

Donde:

ER = Existencias reales (m^3/ha).

VP = Volumen en pie después de la corta o volumen residual (m^3/ha).

i = Incremento en volumen como proporción del volumen residual durante el ciclo de corta.

CC = Ciclo de corta (años).

5.3 Ajuste de los modelos de crecimiento al arbolado residual o en pie después de la corta

5.3.1 Estimación de incrementos

Para estimar los incrementos logrados por los modelos de crecimiento, se ajustaron a la variable volumen del arbolado residual, los modelos de Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld; los incrementos de estos, se obtuvieron tomando la primera derivada de las funciones originales con respecto a la edad (Cuadro 5) y aplicando el resultado a la base de datos de los árboles residuales; por otro lado, el procedimiento utilizado para determinar el incremento en el MMOM, considera el volumen inicial de la edad más pequeña del predio y este dato se multiplica por uno más “ i ” ($1+i$), donde “ i ” es el incremento promedio en volumen del predio como proporción del VP durante el ciclo de corta. El incremento de la edad inmediata posterior a la edad más pequeña, se obtiene de multiplicar el incremento de la edad más pequeña por uno más “ i ”, de tal manera que al aplicar lo anterior se logran los incrementos en las edades consecutivas.

Cuadro 5. Ecuaciones de Incremento Corriente Anual.

Modelo	ICA
*Schumacher	$ICA = \frac{\beta_1}{E^2} y$
*Weibull	$ICA = \beta_1 \beta_2 E^{\beta_2 - 1} (\beta_0 - y)$
*Chapman-Richards	$ICA = \frac{\beta_1 \beta_2 e^{-\beta_1 E}}{(1 - e^{-\beta_1 E})} y$
Hossfeld	$ICA = \frac{\beta_1 E^2 + 2\beta_0 E}{(\beta_2 E^2 + \beta_1 E + \beta_0)^2}$
MMOM	$ICA = Vo(1 + i)$

*Fuente: Ayerde, 1996.

Donde: ICA= Incremento Corriente Anual; Vo= Volumen inicial; i= Incremento en porcentaje.

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Parámetros de regresión.

5.3.2 Pronóstico de las variables diámetro y altura al final del ciclo de corta

El primer paso consistió en ajustar los modelos de Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld a las variables diámetro y altura del arbolado residual, con la finalidad de obtener los nuevos parámetros de ajuste para cada variable.

Bajo la suposición de una curva de crecimiento anamórfica, se indujo a aceptar que el valor asintótico era común para todos los árboles, haciendo que el crecimiento del árbol dependiera ahora sólo de la edad (o de la diferencia de edades entre el momento de corta y el término del ciclo de corta) y del restante parámetro en las ecuaciones. Así, siguiendo la metodología descrita por Monárrez y Ramírez (2003), se desarrolló una forma de diferencia algebraica en las ecuaciones de los modelos para las variables diámetro-edad y altura-edad del arbolado residual del predio.

El procedimiento se basó en identificar los parámetros que originan las variables diámetro y altura, se solucionaron las ecuaciones con respecto a dichos parámetros,

resolviendo para dos mediciones consecutivas de pares de datos de diámetro o altura dominante (y_1 , y_2) y edad ($E1$, $E2$), se igualaron ambas ecuaciones y se resolvieron en términos de la segunda medición. La edad 2 ($E2$) resulta de la adición de la edad actual del individuo ($E1$) más el ciclo de corta determinado por el MMOM.

De esta manera, el Cuadro 6 describe el procedimiento de diferencia algebraica para cada uno de los modelos, mediante el cual se obtienen las ecuaciones de ajuste para curvas anamórficas, en este caso de utilidad para determinar los diámetros y alturas individuales al final del ciclo de corta del arbolado residual.

Cuadro 6. Ecuaciones por el método de diferencia algebraica.

Modelo	Ecuación	Despejando β_0 en H1	Sustituyendo β_0 en H2 (Ecuación de ajuste para curvas anamórficas)
Schumacher	$y_1 = \beta_0 e^{-\beta_1 \frac{1}{E1}}$ $y_2 = \beta_0 e^{-\beta_1 \frac{1}{E2}}$	$\beta_0 = y_1 e^{\beta_1 \frac{1}{E1}}$	$y_2 = y_1 e^{\beta_1 \frac{1}{E1} - \frac{1}{E2}}$
Chapman-Richards	$y_1 = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 * E1})^{\beta_2}$ $y_2 = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 * E2})^{\beta_2}$	$\beta_0 = y_1 (1 - e^{-\beta_1 E1})^{-\beta_2}$	$y_2 = y_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2}}{1 - e^{-\beta_1 E1}} \right]^{\beta_2}$
Weibull	$y_1 = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 * E1^{\beta_2}})$ $y_2 = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 * E2^{\beta_2}})$	$\beta_0 = y_1 (1 - e^{-\beta_1 E1^{\beta_2}})$	$y_2 = y_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 E1^{\beta_2}}} \right]$
Hossfeld	$y_1 = \frac{E1}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 E1^2}$ $y_2 = \frac{E2}{\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 E2^2}$	$\beta_0 = \frac{E1}{y_1} - [\beta_1 E1 + \beta_2 E1^2]$	$y_2 = \frac{E2}{\frac{E1}{y_1} - (\beta_1 E1 + \beta_2 E1^2) + \beta_1 E2 + \beta_2 E2^2}$

Donde:

y_1 = Diámetro o Altura dominante a la edad 1; y_2 = Diámetro o Altura dominante a la edad 2. $E1$ = Edad 1 (años); $E2$ = Edad al fin del ciclo de corta (Edad 1 + Ciclo de Corta); $\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión.

Posteriormente, se sustituyeron los parámetros de regresión de los modelos originales en las ecuaciones de ajuste para curvas anamórficas (ilustradas en el Cuadro 6) y de esta manera obtener los diámetros y alturas por árbol al final del ciclo de corta (Dn_2 y $Altura_2$).

5.3.3 Volumen final (ER) al ciclo de corta ajustando modelos de crecimiento

El siguiente paso consistió en determinar el volumen individual al final del ciclo de corta de cada árbol a través de los nuevos valores de diámetro (Dn_2) y altura ($Altura_2$) derivados de las ecuaciones de ajuste para curvas anamórficas. La ecuación de volumen utilizada fue la misma que originó el volumen individual a la edad inicial:

$$Vol = e^{(-9.58801453 + 1.75592913 \log(Dn) + 1.07004135 \log(h))}$$

El volumen individual incrementado al final del ciclo de corta resultó de la diferencia entre el volumen al final del ciclo de corta (Vol_2) y el volumen inicial (Vol_1):

$$Vol_incrementado = Vol_2 - Vol_1$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Análisis del arbolado

6.1.1 Aplicación de las funciones de crecimiento

6.1.1.1 Crecimiento en diámetro

Para conocer la conducta de los datos utilizados en el presente estudio, se procedió a graficar su comportamiento y enseguida ajustar algún modelo predictor de crecimiento.

González (1997 y 2000) realizó trabajos relacionados en crecimientos de pinos empleando modelos de ajuste y menciona el modelo Schumacher como uno de los que presentaron buen ajuste.

Por lo anterior se procedió a ajustar el modelo Schumacher y se obtuvieron parámetros favorecedores al comportamiento de los datos: una suma de cuadrados de error mínima (SCE) de 1057.8 y un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, además de revisar otros criterios de bondad de ajuste como el cuadrado medio del error e intervalos de confianza de los estimadores, se determinó un parámetro inicial del valor asintótico (B_0) de 79.7113, y parámetro de la tasa de crecimiento (B_1) de 25.1957.

La primera derivada de la función Schumacher generó el incremento corriente anual en diámetro; asimismo la curva de incremento medio anual se obtuvo de dividir la ecuación original entre la edad (Figura 3). Enseguida se obtuvo el punto de culminación del ICA

que sucede a la edad de 12.5 años; el punto de culminación del IMA o punto de intersección donde $ICA=IMA$, ocurre a la edad de 25.1 años.

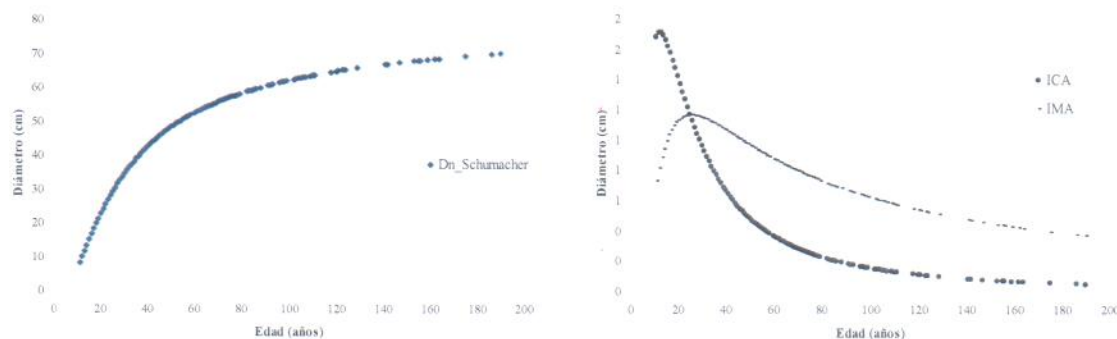


Figura 3. Patrón de crecimiento e incremento en diámetro, empleando el modelo Schumacher.

6.1.1.2 Crecimiento en altura

Para el crecimiento en altura se probaron los cuatro modelos que se plantean en esta investigación (Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld). Los parámetros estimados de cada modelo así como los criterios de bondad de ajuste se resumen en el Cuadro 7, el cual evidencia que para la altura total, el mejor modelo es Hossfeld.

Se ajustó el modelo Hossfeld al comportamiento de los datos y se obtuvieron las curvas de incremento corriente e incremento medio anual de la función de crecimiento (Figura 4), enseguida se determinó el punto de culminación del ICA, que ocurre a la edad de 9.95 años y el IMA que culmina a la edad de 17.56 años.

Cuadro 7. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable altura de los árboles presentes en el predio.

Parámetros estimados y criterios de ajuste	Schumacher	Chapman - Richards	Weibull	Hossfeld
B_0	31.3218	27.8213	27.8831	10.5820
B_1	14.1413	0.0526	0.0239	0.1179
B_2	-----	1.5137	1.1494	0.0343
SCE	25948.7	26748.4	27126.3	25000.1
CME	7.0170	7.2352	7.3374	6.7623
Pseudo R^2	0.9895	0.9892	0.9890	0.9899
Intervalos de confianza de los estimadores	B0	B0	B0	B0
	(31.1592-31.4844)	(27.7038-27.9387)	(27.7593-28.0069)	(9.5839-11.5801)
	B1	B1	B1	B1
	(14.4752 - 13.807)	(0.0500 -0.0553)	(0.0207 - 0.0270)	(0.0730 - 0.1628)
PCICA	7.07	B2	B2	B2
		(1.4039 - 1.6234)	(1.1098 - 1.1890)	(0.0340 - 0.0347)
PCIMA	14.14	14.80	8.30	17.56

Donde:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = Parámetros de regresión; SCE= Suma de cuadrados del error; CME= Cuadrado medio del error; PCICA= Punto de culminación del ICA; PCIMA= Punto de culminación del IMA;

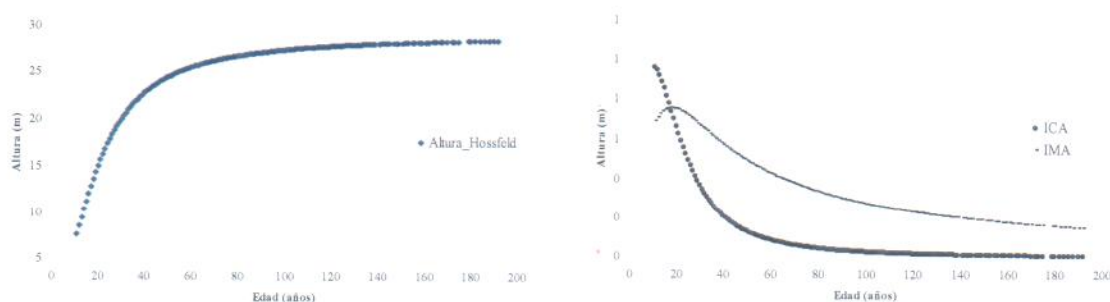


Figura 4. Patrón de crecimiento e incremento en altura, empleando modelo Hossfeld.

6.1.1.3 Crecimiento en Volumen

Para conocer el comportamiento del volumen del arbolado en análisis, se probaron también los cuatro modelos (Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Hossfeld); al realizar las regresiones para cada modelo y obtener los valores de los parámetros y criterios de bondad de ajuste (Cuadro 8), se dedujo que, el modelo Schumacher es el que mejor ajusta a los datos volumétricos.

Se graficó la función Schumacher con sus curvas de incremento corriente e incremento medio anual (Figura 5) y se obtuvieron los puntos de culminación del ICA, el cual sucede a la edad de 29.27 años, y el punto de culminación del IMA o punto de intersección donde ICA=IMA que ocurre a los 58.54 años.

Cuadro 8. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable volumen de los árboles presentes en el predio.

Parámetros estimados y criterios de ajustes	Schumacher	Chapman-Richards	Weibull	Hossfeld
B_0	5.8957	3.6295	3.3904	1435.3
B_1	58.5442	0.0376	0.000094	-18.4145
B_2	-----	3.8856	2.3211	0.3367
SCE	305.3	404.8	585.0	577.1
CME	0.00679	0.00900	0.01300	0.01280
Pseudo R^2	0.9868	0.9825	0.9747	0.9750
Intervalos de confianza de los estimadores	B_0	B_0	B_0	B_0
	(5.8835 - 5.9079)	(3.6192 - 3.6397)	(3.3803 - 3.4005)	(1426.0 - 1444.6)
	B_1	B_1	B_1	B_1
	(58.631 - 58.457)	(0.0374 - 0.0378)	(0.000092 - 0.000096)	(-18.7491 - -18.0799)
		B_2	B_2	B_2
		(3.8643 - 3.9069)	(2.3142 - 2.3280)	(0.3341 - 0.3393)
PCICA	29.27	36.10	42.60	41.57
PCIMA	58.54	61.00	65.72	65.29

Donde:

$\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión; SCE= Suma de cuadrados del error; CME= Cuadrado medio del error; PCICA= Punto de culminación del ICA; PCIMA= Punto de culminación del IMA;

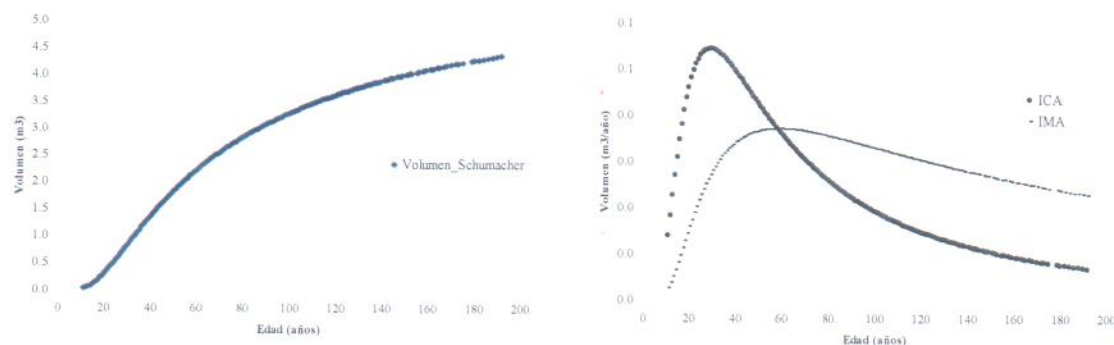


Figura 5. Patrón de crecimiento e incremento en volumen, empleando modelo Schumacher.

6.2 Aplicación del Método Mexicano de Ordenación de Montes

Después de realizar el análisis del comportamiento del arbolado, se procedió a la aplicación del método de manejo denominado Método Mexicano de Ordenación de Montes, con sus respectivos cálculos para obtener la posibilidad de extracción maderable.

6.2.1 Determinación del ICA en volumen

La primera etapa del análisis de la información consistió en la determinación del incremento corriente anual del predio. Para este objetivo, se utilizó el método de Loetsch (Carrillo, 1998), el cual arrojó como resultado el ICA por hectárea por rodal, lo anterior dividido entre las existencias reales por hectárea y multiplicado por cien, determinó el incremento corriente anual en porcentaje (Cuadro 9).

Cuadro 9. Incremento Corriente Anual.

Rodal	ICA (m ³ /ha)	ER/ha m ³ V.T.A.	ICA %
1	2.1735	118.8724	1.83
2	2.4082	119.3297	2.02
3	2.1782	110.5385	1.97
4	2.4253	118.4661	2.05
5	2.3840	120.5422	1.98
6	2.4154	122.2076	1.98
7	2.3005	118.6944	1.94
8	2.2755	117.9952	1.93

Donde:

ICA= Incremento corriente anual; ER/ha= Existencias reales por hectárea; V.T.A.= Volumen total árbol.

El suponer que dado un volumen residual, la tasa de crecimiento de la población (en este caso el ICA), es la misma independientemente de la distribución de tamaños, es muy restrictivo, debido a que el crecimiento poblacional es la suma de los crecimientos

individuales, mismos que dependen de la estructura de tamaños y la proporción de especies (Torres, 1999).

6.2.2 Existencias volumétricas totales

Para determinar las existencias reales totales o volumen total presente por rodal, sólo se sumaron los volúmenes de los árboles contenidos dentro de cada rodal; las existencias reales por hectárea resultaron de dividir las existencias reales totales entre la superficie del rodal (Cuadro 10).

Cuadro 10. Existencias volumétricas por rodal.

Rodal	Superficie (has)	ERT m ³ V.T.A	ER/ha m ³ V.T.A.
1	20.50	2, 436.8845	118.8724
2	20.20	2, 410.4593	119.3297
3	19.00	2, 100.2324	110.5385
4	22.30	2, 641.7937	118.4661
5	14.10	1, 699.6444	120.5422
6	19.00	2, 321.9443	122.2076
7	16.50	1, 958.4570	118.6944
8	18.40	2, 171.1112	117.9952
		17, 740.5268	

Donde:

ER/ha= Existencias reales por hectárea; V.T.A.= Volumen total árbol.

6.2.3 Volumen residual o volumen en pie después de la corta

Con la eliminación aleatoria de 30% de las existencias volumétricas en cada rodal, se dejó el volumen residual total, que al dividirlo entre la superficie del predio dio como resultado el volumen residual por hectárea (Cuadro 11).

Cuadro 11. Volúmenes residuales por rodal.

Rodal	Superficie (has)	Vol. residual (m ³ /ha)	Vol. residual total (m ³)
1	20.50	83.2189	1,705.9870
2	20.20	83.5504	1,687.7182
3	19.00	77.3830	1,470.2763
4	22.30	82.9388	1,849.5349
5	14.10	84.3816	1,189.7800
6	19.00	85.5522	1,625.4923
7	16.50	83.0897	1,370.9804
8	18.40	82.6014	1,519.8664
			12,419.6355

6.2.4 Posibilidad volumétrica a extraer

La intensidad de corta o proporción de volumen a extraer se deduce por el hecho de haber realizado la eliminación aleatoria del 30% del arbolado presente en el predio.

La posibilidad total se obtuvo por la diferencia entre las existencias reales totales y el volumen residual total; así también la posibilidad por hectárea se generó del cociente de la división de la posibilidad total y la superficie del rodal (Cuadro 12).

Cuadro 12. Intensidad de corta y posibilidad volumétrica por rodal.

Rodal	Sup. (has)	Intensidad de corta (%)	Posibilidad (m ³ /ha)	Posibilidad total (m ³)
1	20.50	30	35.6535	730.8975
2	20.20	30	35.7793	722.7411
3	19.00	30	33.1556	629.9561
4	22.30	30	35.5273	792.2588
5	14.10	30	36.1606	509.8644
6	19.00	30	36.6554	696.4520
7	16.50	30	35.6046	587.4766
8	18.40	30	35.3937	651.2448
				5,320.8913

6.2.5 Determinación del ciclo de corta

El ciclo de corta se obtuvo por la diferencia logarítmica de las existencias reales y el volumen residual por hectárea dividido entre el logaritmo de uno más el incremento del rodal.

En el Cuadro 13, se observa que los ciclos de corta varían muy poco entre rodales, esto se debe al comportamiento homogéneo de los datos. Así para el rodal 1 se tiene un ciclo de corta de 20 años, para el rodal 8 el ciclo de corta es de 19, mientras que para los otros rodales resultó de 18 años.

Cuadro 13. Ciclo de corta por rodal.

Rodal	Sup. (has)	ER/ha m ³ V.T.A.	Vol. residual (m ³ /ha)	Proporción de ICA ("i")	Ciclo corta
1	20.50	118.8724	83.2189	0.0183	20
2	20.20	119.3297	83.5504	0.0202	18
3	19.00	110.5385	77.3830	0.0197	18
4	22.30	118.4661	82.9388	0.0205	18
5	14.10	120.5422	84.3816	0.0198	18
6	19.00	122.2076	85.5522	0.0198	18
7	16.50	118.6944	83.0897	0.0194	18
8	18.40	117.9952	82.6014	0.0193	19

Donde:

ICA= Incremento corriente anual; ER= Existencia reales.

6.2.6 Volumen a recuperar al final del ciclo de corta

El volumen final o volumen a recuperar al final del ciclo de corta (ER) se obtiene al multiplicar el volumen residual total y el incremento más uno elevado al ciclo de corta.

En el Cuadro 14, se observa que después de la corta el volumen residual en el predio es de 12, 419.6355 m³ y que para el término del ciclo de corta el volumen a recuperar será

de 17,740.5268 m³, que es equivalente a las existencias reales totales presentes en el predio antes de la aplicar la corta; con la implementación del MMOM se espera recuperar el volumen extraído en un lapso de aproximadamente 20 años.

Cuadro 14. Volumen final al ciclo de corta por rodal.

Rodal	Sup. (has)	Vol. residual total (m ³)	Proporción de ICA ("i")	Ciclo corta	Volumen final (ER)
1	20.50	1, 705.9870	0.0183	20	2,436.8845
2	20.20	1, 687.7182	0.0202	18	2,410.4593
3	19.00	1, 470.2763	0.0197	18	2,100.2324
4	22.30	1, 849.5349	0.0205	18	2,641.7937
5	14.10	1, 189.7800	0.0198	18	1,699.6444
6	19.00	1, 625.4923	0.0198	18	2,321.9443
7	16.50	1,370.9804	0.0194	18	1,958.4570
8	18.40	1,519.8664	0.0193	19	2,171.1112
		12, 419.6355			17,740.5268

Donde:

ICA= Incremento corriente anual.

6.3 Análisis del arbolado residual

6.3.1 Comparación de incrementos entre el MMOM y los pronosticados por los modelos de crecimiento

Con la intención de obtener los incrementos en volumen, se ajustaron los cuatro modelos de crecimiento a la variable volumen del arbolado residual, del que resultaron los parámetros y criterios de bondad de ajuste mencionados en el Cuadro 15. Los parámetros de cada modelo, se introdujeron a la base de datos y se logró predecir el nuevo valor del volumen.

Cuadro 15. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable volumen del arbolado residual.

Parámetros estimados y criterios de ajustes	Schumacher	Chapman-Richards	Weibull	Hossfeld
B_0	5.8961	3.6281	3.3897	1432.5
B_1	58.5693	0.0375	0.000095	-18.2409
B_2	-----	3.8756	2.3153	0.3355
SCE	214.6	285.7	413.2	406.2
CME	0.00681	0.00907	0.0131	0.0129
Pseudo R^2	0.9867	0.9823	0.9744	0.9748
Intervalos de confianza de los estimadores	B_0	B_0	B_0	B_0
	(5.8814 – 5.9108)	(3.6157 – 3.6405)	(3.3774 – 3.4019)	(1421.4 – 1443.7)
	B_1	B_1	B_1	B_1
	(58.6736 – 58.4650)	(0.0373 – 0.0378)	(0.000093 – 0.000098)	(-18.6419- -17.840)
		B_2	B_2	B_2
		(3.8500 – 3.9011)	(2.3070 – 2.3235)	(0.3323 – 0.3386)

Donde:

$\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión; SCE= Suma de cuadrados del error; CME= Cuadrado medio del error.

Posteriormente mediante el criterio de la primera derivada de las funciones originales, se generó el incremento por árbol, los cuales se resumieron en una nueva tabla que expresaba las edades del rodal y los incrementos promedios pronosticados por cada modelo.

También fue necesario obtener los incrementos en volumen generados por el MMOM, lo que en primera instancia llevó a definir el incremento promedio del predio (ICA) y fue determinado en 0.02 (“i”). Enseguida, se ordenaron las edades en orden descendente; a la edad más pequeña se le anexó su volumen final promedio (que fue la base para obtener los incrementos en las edades consecutivas), así, a dicho volumen se le multiplicó por “1+i”, logrando con ello el volumen incrementado a la edad siguiente, lo anterior aplicado consecutivamente, cubrió las edades restantes del predio.

Con el objeto de comparar los incrementos generados por los modelos de crecimiento y el MMOM, se ordenaron las edades del rodal con sus respectivos incrementos y se graficaron. Uno de los supuestos del MMOM señalado por Torres (1999) es que la tasa de crecimiento es constante a lo largo del periodo (ciclo de corta) y acumulable con la densidad, esto es, sigue un comportamiento exponencial como lo ilustra la Figura 6. Torres (1999) también menciona que el supuesto es bastante fuerte dado que toda población tiene una tasa de crecimiento dinámica. Por otro lado las curvas de incremento logradas por los modelos en estudio, adquieren una curva logística, es decir, un incremento rápido al inicio, disminuyendo al aumentar la edad.

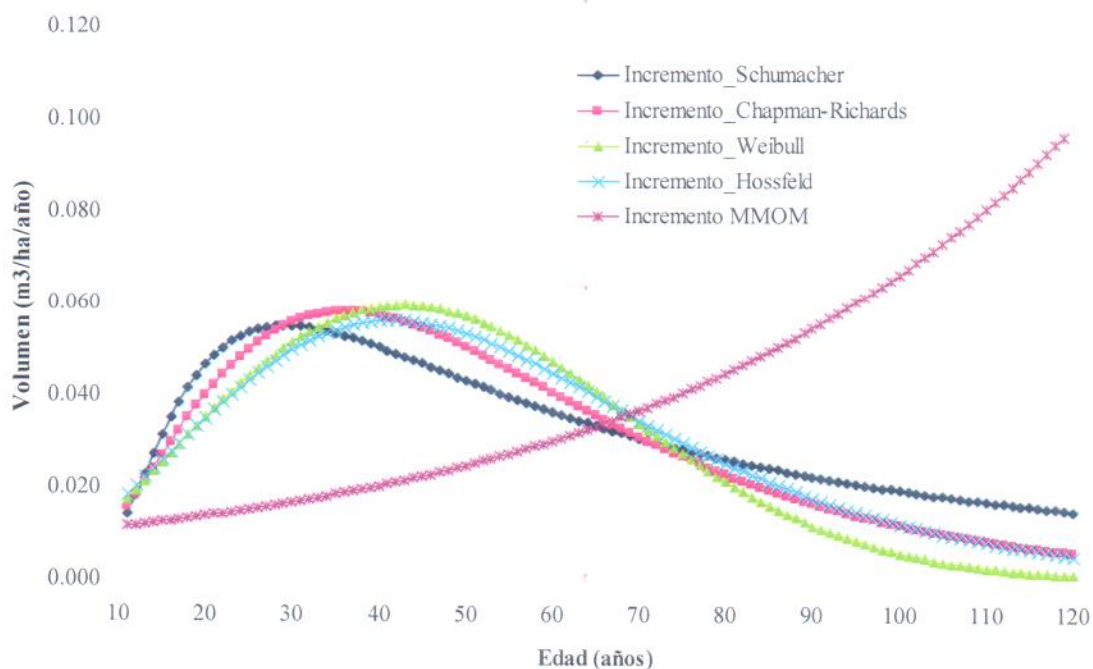


Figura 6. Incremento promedio por edad entre los modelos de crecimiento y el MMOM

Al disminuir la escala de edad en la Figura 6, se logra visualizar lo que sucede en las edades más jóvenes del rodal. En esta etapa (Figura 7) se observa que el MMOM subestima los incrementos en contraposición con los modelos.

En todos los casos se coincide en que la tasa de crecimiento de una población tiene rendimientos marginales decrecientes, esto es, es muy acelerada cuando la población es poco densa, logra un máximo y cae paulatinamente a medida que la población crece. La relación es obviamente variable siendo que en edades más jóvenes y al eliminarles competencia los árboles crecen rápidamente (Torres, 1999).

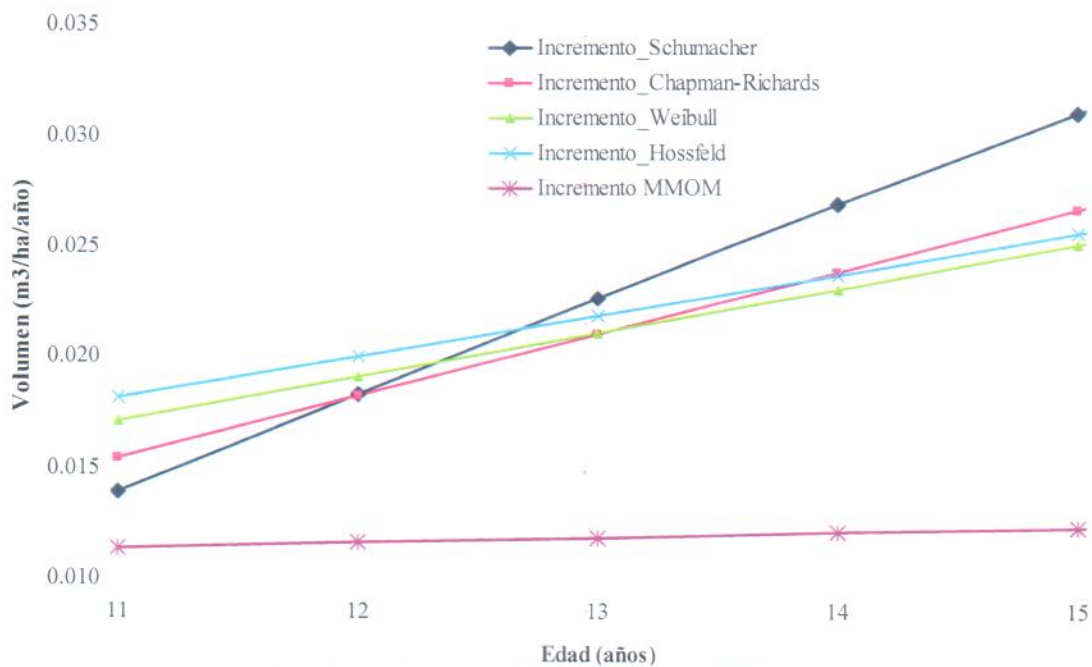


Figura 7. Incremento en edades tempranas.

Por otro lado, en la Figura 8, se ilustra el comportamiento de los incrementos en árboles en edades superiores a los 65 años, en ella se observa que el MMOM sobreestima dichos incrementos, suponiendo que el árbol sigue desarrollándose y se contradice con el crecimiento natural del organismo. En toda población, existe un tiempo en el cual todo organismo deja de crecer, permanece de un mismo tamaño durante algún tiempo y finalmente muere, determinado por la naturaleza genética del organismo y sus limitaciones ambientales (Klepac, 1983; Ramírez y Zepeda, 1994).

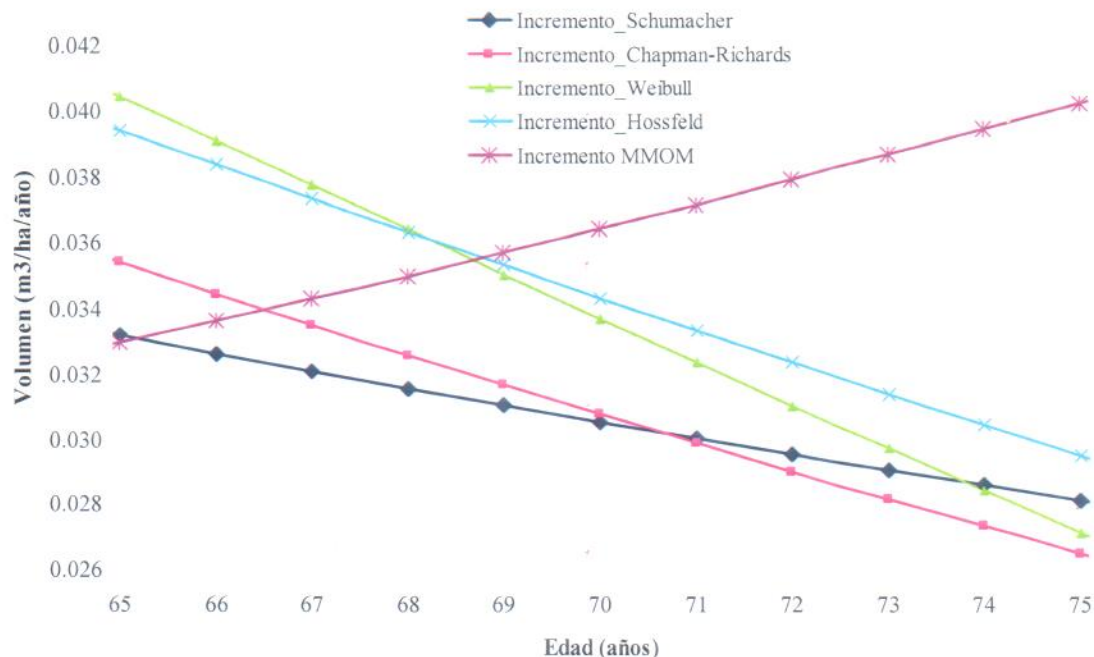


Figura 8. Incremento en edades tardías.

Torres (1999) asegura que el suponer un crecimiento exponencial es el que mayor impacto tiene en el cálculo del volumen de cosecha, ya que mientras más largo sea el ciclo de corta se supone un periodo de tiempo más largo de crecimiento exponencial, mismo que una masa natural no puede sostener. Ello implica que mientras más largo es el ciclo de corta es más probable que el bosque no recupere las existencias que supuestamente debe tener.

6.3.2 Pronóstico de las variables diámetro y altura al final del ciclo de corta

Determinar el volumen de los árboles al final del ciclo de corta, depende de las variables diámetro y altura alcanzada a esa edad, debido a ello se obtuvieron los parámetros de ajuste del diámetro normal (Cuadro 16) y altura total (Cuadros 17) de cada modelo propuesto a partir de los datos del arbolado residual.

Cuadro 16. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable diámetro normal del arbolado residual.

Parámetros estimados y criterios de ajuste	Schumacher	Chapman - Richards	Weibull	Hossfeld
B_0	79.8799	69.0081	68.9542	7.7415
B_1	25.3044	0.0268	0.0146	0.2470
B_2	-----	1.2591	1.1138	0.0128
SCE	6.4296	44.0083	53.1838	3.4403
CME	0.1837	1.2944	1.5642	0.1012
Pseudo R^2	0.9999	0.9996	0.9996	0.9999
Intervalos de confianza de los estimadores	B0	B0	B0	B0
	(79.5279 – 80.2319)	(68.1545 – 69.8618)	(67.9300 – 69.9784)	(7.2621 – 8.2209)
	B1	B1	B1	B1
	(25.6568 – 24.9520)	(0.0245 – 0.0291)	(0.0112 – 0.0180)	(0.2305 – 0.2634)
		B2	B2	B2
		(1.1386 – 1.3795)	(1.0497 – 1.1778)	(0.0127 – 0.0129)

Donde:

$\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión; SCE= Suma de cuadrados del error; CME= Cuadrado medio del error.

Cuadro 17. Parámetros estimados y criterios de bondad de ajuste para la variable altura del arbolado residual.

Parámetros estimados y criterios de ajuste	Schumacher	Chapman - Richards	Weibull	Hossfeld
B_0	31.2988	27.8769	27.9342	10.0066
B_1	14.2109	0.0492	0.0257	0.1576
B_2	-----	1.4039	1.1206	0.0341
SCE	19.9427	30.2412	33.2617	13.5715
CME	0.5698	0.8894	0.9783	0.3992
Pseudo R^2	0.9992	0.9988	0.9986	0.9994
Intervalos de confianza de los estimadores	B0	B0	B0	B0
	(30.8179 – 31.7798)	(27.4398 – 28.3141)	(27.4520 – 28.4164)	(7.4832 – 12.5300)
	B1	B1	B1	B1
	(15.2047 – 13.2171)	(0.0402 – 0.0582)	(0.0133 – 0.0381)	(0.0444-0.2708)
		B2	B2	B2
		(1.0510 – 1.7568)	(0.9768 – 1.2644)	(0.0332 – 0.0349)

Donde:

$\beta_0 \beta_1 \beta_2$ = Parámetros de regresión; SCE= Suma de cuadrados del error; CME= Cuadrado medio del error.

Los parámetros estimados de las variables diámetro y altura, se sustituyeron en las ecuaciones de ajuste para curvas anamórficas (Cuadro 18), aplicándolo a cada individuo del arbolado remanente, de esta manera se pronosticaron los nuevos diámetros y alturas que alcanzarían los árboles al término del ciclo de corta y consiguientemente el volumen; aunque se obtuvieron los parámetros de regresión de todos los modelos propuestos, sólo funcionó para los modelos Schumacher, Chapman-Richards y Weibull, ya que con el modelo Hossfeld no se pudo adoptar el ajuste por medio de curvas anamórficas.

Cuadro 18. Ecuación de ajuste para curvas anamórficas de las variables diámetro normal y altura.

Modelo	Dn _2	Altura _2
Schumacher	$Dn_2 = Dn_1 e^{\beta_1 \frac{1}{E1} - \frac{1}{E2}}$	$Altura_2 = Altura_1 e^{\beta_1 \frac{1}{E1} - \frac{1}{E2}}$
Chapman-Richards	$Dn_2 = Dn_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2}}{1 - e^{-\beta_1 E1}} \right]^{\beta_2}$	$Altura_2 = Altura_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2}}{1 - e^{-\beta_1 E1}} \right]^{\beta_2}$
Weibull	$Dn_2 = Dn_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 E1^{\beta_2}}} \right]$	$Altura_2 = Altura_1 \left[\frac{1 - e^{-\beta_1 E2^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 E1^{\beta_2}}} \right]$
E1= Edad actual. E2= Edad al final del ciclo de corta (edad actual + ciclo de corta).	Dn _1=Diámetro actual. Dn _2= Diámetro al final del ciclo de corta.	Altura _1= Altura actual. Altura _2= Altura al final del ciclo de corta.

6.3.3 Volúmenes al final del ciclo de corta obtenidos con las funciones de crecimiento

Una vez determinado los diámetros y alturas para cada uno de los árboles residuales al final del ciclo de corta, se calculó el volumen de cada árbol.

La diferencia entre el volumen al final del ciclo de corta (edad 2) y el volumen inicial (edad 1) determinó el volumen incrementado del árbol que se resume en el Cuadro 19; en éste se observa que el modelo Schumacher predice un aumento en volumen en $19,899.8447 \text{ m}^3$ y estima un incremento con respecto al volumen residual de $7,480.2092 \text{ m}^3$; por otro lado el modelo de Chapman-Richards predice un incremento en volumen de $17,664.7472 \text{ m}^3$ ganando un volumen al final del ciclo de corta de $5,245.1117 \text{ m}^3$; y el modelo Weibull resultó ser el que menor volumen predice al término del ciclo de corta, estimando un volumen de $16,267.3918 \text{ m}^3$, logrando con ello un aumento en volumen de $3,847.7563 \text{ m}^3$.

Cuadro 19. Comparación de los volúmenes obtenidos al final del ciclo de corta entre los modelos de crecimiento.

Rodal	Volumen residual	Ciclo de corta	Volumen incrementado Schumacher	Volumen incrementado Chapman-Richards	Volumen incrementado Weibull
1	1,705.9870	20	2,980.8214	2,668.8925	2,458.6669
2	1,687.7182	18	2,633.4321	2,339.6161	2,155.0829
3	1,470.2763	18	2,407.2594	2,125.8381	1,956.2350
4	1,849.5349	18	2,870.8661	2,545.4976	2,344.6754
5	1,189.7800	18	1,860.7250	1,641.9244	1,511.1489
6	1,625.4923	18	2,511.1399	2,227.8314	2,052.4656
7	1,370.9804	18	2,117.2722	1,866.5502	1,717.2994
8	1,519.8664	19	2,518.3285	2,248.5968	2,071.8175
Vol. total	12,419.6355		19,899.8447	17,664.7472	16,267.3918
Increm. ganado al CC			7,480.2092	5,245.1117	3,847.7563

6.4 Comparación de los volúmenes al final del ciclo de corta entre el MMOM y los pronosticados por las funciones de crecimiento

Es importante hacer mención que la composición del arbolado, en este caso el número de árboles por categorías de edad presentes en el predio, influye en la determinación de los volúmenes al final del ciclo de corta pronosticados por cada uno de los modelos; en la Figura 9, se puede apreciar que la mayor parte del arbolado se distribuye entre las edades de 10 y 20 años.

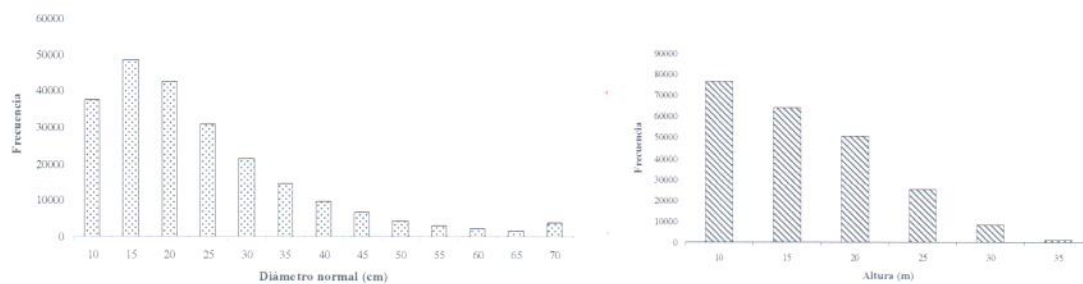


Figura 9. Estructura de diámetros y alturas por categorías de edad.

En el Cuadro 20 se comparan los volúmenes al final del ciclo de corta entre los predichos por los modelos y el MMOM; en él, se observa que el modelo Schumacher estima 2159.32 m³ más de lo que pronostica el MMOM, mientras que el Chapman-Richards, predice un volumen de recuperación un poco inferior al MMOM, con sólo una diferencia volumétrica de 75.78 m³ y el modelo Weibull estima un menor volumen de recuperación, en 1473.14 m³ menos que el predicho por el MMOM.

Cuadro 20. Comparación de los volúmenes obtenidos al final del ciclo de corta entre el MMOM y los modelos de crecimiento.

Rodal	Volumen residual	Ciclo de corta	Volumen incrementado MMOM	Volumen incrementado Schumacher	Volumen incrementado Chapman-Richards	Volumen incrementado Weibull
1	1,705.9870	20	2,436.8845	2,980.8284	2,668.8925	2,458.6669
2	1,687.7182	18	2,410.4593	2,633.4321	2,339.6161	2,155.0829
3	1,470.2763	18	2,100.2324	2,407.2594	2,125.8381	1,956.2350
4	1,849.5349	18	2,641.7937	2,870.8661	2,545.4976	2,344.6754
5	1,189.7800	18	1,699.6444	1,860.7250	1,641.9244	1,511.1489
6	1,625.4923	18	2,321.9443	2,511.1399	2,227.8314	2,052.4656
7	1,370.9804	18	1,958.4570	2,117.2722	1,866.5502	1,717.2994
8	1,519.8664	19	2,171.1112	2,518.3285	2,248.5968	2,071.8175
Vol. total	12,419.6355		17,740.5268	19,899.8516	17,664.7471	16,267.3916
Increm. ganado al CC			5,320.8913	7,480.2161	5,245.1116	3,847.7561

En la Figura 10, se ilustra gráficamente el Cuadro 20, distribuyendo los volúmenes pronosticados al final del ciclo de corta en todas las edades del rodal. Se puede apreciar que con el MMOM se obtiene un incremento casi constante en las diferentes edades, mientras que con los modelos de crecimientos, los máximos volúmenes se logran entre las edades de 10 y 20 años.

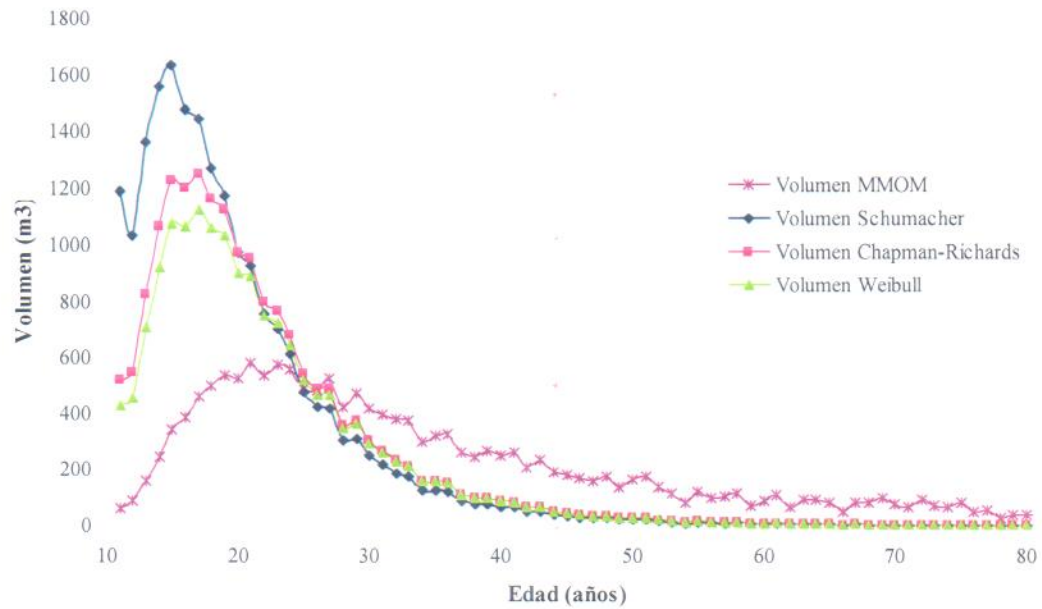


Figura 10. Comparación entre los volúmenes calculados por los modelos de crecimiento y el MMOM.

Observando la Figura 10 y tomando en cuenta la composición del rodal mencionada en la Figura 9, se deduce que el comportamiento de elevación abrupta de la gráfica en los primeros años, se debe a al gran número de árboles localizados entre estas edades.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo, para la predicción de las variables diámetro y altura que determinaron el volumen al final del ciclo de corta, se emplearon los modelos de Schumacher, Chapman-Richards y Weibull; los tres presentaron criterios de ajuste altos, como es el caso del coeficiente de determinación que fue de 0.99, así como las SCE similares entre ellas; sin embargo, se observa que con la aplicación del modelo Schumacher se sobreestima el volumen final en gran medida comparado con el MMOM, mientras que el modelo Chapman-Richards, estima un volumen semejante al predicho por el MMOM y el modelo Weibull, disminuye significativamente el pronóstico del volumen final comparado con el MMOM.

Por lo anterior y retomando la hipótesis planteada en la investigación, se deduce que el estimar el volumen al final del ciclo de corta (*ER*) mediante la aplicación de modelos de crecimiento, pronostica con mayor certeza el volumen a recuperar. Lo anterior se debe a que los incrementos en volumen los determina siguiendo un patrón logístico de crecimiento, dando con ello mayor garantía al Método Mexicano de Ordenación de Montes; no obstante, es importante aclarar que el modelo predictor (Schumacher, Weibull o Chapman-Richards) para definir el volumen final (*ER*), sea utilizado de acuerdo al criterio del silvicultor, tomando en cuenta las bondades que el modelo ofrece para suponer el comportamiento del arbolado en el bosque.

En esta investigación se ha llegado a la determinación de la productividad del bosque en términos de rendimiento físico, netamente maderables; sin embargo dadas las exigencias

actuales de sustentabilidad de los recursos naturales y para efecto de la eficiencia económica, se deben involucrar factores como la tasa de interés, para que en función de ello se determine la maximización económica de los bosques; así como los valores asociados al flujo de servicios ambientales y su integración con las propuestas de manejo, definiendo criterios en la administración de estructuras residuales (Torres, 1999) que permitan mantener la biodiversidad, salud, productividad, así como la producción de múltiples bienes y servicios en el largo plazo.

8. BIBLIOGRAFÍA

ALDER, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos. Vol. 2. Predicción del Rendimiento. FAO. Montes. Estudio 22/2. Roma. 118 P.

ADLARD, P. M. A. 1983. Clases de modelos de crecimiento en masas forestales y tipos de variables necesarias para su calibración. *In*: Primera reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. SARH-SF-INIF. Pub. Esp. 44. pp. 47-53.

AYERDE, L. D. 1996. Análisis de curvas de crecimiento de árboles y masas forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales, Chapingo México. 255 p.

BARASORDA, M. 1977. Estudio de distribución horizontal y densidad en bosque de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser. Tesis para optar al título de Ingeniero Forestal. Depto. de Silvicultura. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 1977.

BRIENEN, R. y ZUIDEMA, P. (2003). Anillos de crecimiento de árboles maderables en Bolivia: su potencial para el manejo de bosques y una guía metodológica. PROMAB / IGEMA, Informe Técnico N° 7, Riberalta, Bolivia. 33 p.

CARRILLO, A. F., ACOSTA, M. M., FLORES, A. E., BUENDÍA, R. E. 2005. La Silvicultura en México. (en línea). Revista Teorema Ambiental. 52 (1): 11-15. Consultado 18 enero 2008. Disponible en http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=49&id_art=140.

CARRILLO, E. G. 1998. Apuntes del curso de epidometría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, México. 187 p.

CLUTTER, J. L., J. C. FORTSON, L. V. PIENAAR, G. H. BRISTER & R. L. BAILEY. 1983. Timber management a quantitative approach. Wiley, New York. 333 p.

COUTIÑO, A. E. 1969. Comparación de métodos para el cálculo del incremento en bosques de coníferas. Tesis de Ing. Agrónomo Especialista en Bosques. Chapingo, México, 118 p.

CORVALAN, V. P. y HERNANDEZ, P. J. 2006. Densidad de rodal. *In*: Apuntes de dasometría. Depto. de Manejo de Recursos Forestales. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Chile. 5 p.

CUMPLIDO, O. R. 2002. Tablas de volúmenes y de incrementos para tres especies del género *Pinus* de tres predios del estado de Chihuahua. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 105 p.

DANIEL, P. W., HELMS, U. E. y BAKER, F. S. 1982. Principios de silvicultura. Trad. de la 2a. ed. en inglés por Ramón Elizondo Mata. México. McGraw-Hill. 492 p.

DAVIS, L. S., K. N. JOHNSON, P. S. BETTINGER y T. E. HOWARD. 2001. Forest Management. 4th ed. McGraw-Hill series in Forest Resources. 804 p.

DIRECCIÓN GENERAL DE APROVECHAMIENTO FORESTALES. 1984. Antecedentes y evolución del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares. Subsecretaría Forestal, SARH. 13 p.

DIRECCIÓN GENERAL DEL INVENTARIO NACIONAL FORESTAL. 1976. Inventario forestal del estado de Chiapas. SAG.SFF. Pub. Núm. 34. 78 p.

GARCÍA, C. X. 1998. Predicción del rendimiento de *Swetenia microphylla* King (Caoba) en plantaciones forestales. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Programa Forestal. Montecillo, México. 119p.

GARCÍA, O. 1995. Apuntes de mensura forestal. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. 66 p.

GONZÁLEZ, L. H. D. 1997. Calidad de sitio, crecimiento e incremento de la regeneración de *Pinus rudis* Endl. De la región de San José de la Joya, Galeana, Nuevo León. Tesis profesional. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. 121 p.

-----, 2001. Calidad de sitio mediante análisis troncal y crecimiento entre verticilos en regeneración de *Pinus rudis* Endl. Tesis Maestría en Ciencias. U.A.A.A.N. Buenavista, Saltillo, México. 117 p.

HUSCH, B., MILLER, C. y BEERS, T. 1993. Forest Mensuration. Krieger Publishing Company, Third Edition Malabar, Florida.

KLEPAC, D. 1976. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 365 p.

LOETSCH, F., F. ZÖHRER, y K. E. HALLER. 1973. Forest inventory. Trans. por K. F. Panzer. München, BLV. V. 2. 469 p.

MÁRQUEZ, E. 2000. Distribución espacial de poblaciones. (en línea). Consultado el 15 de septiembre de 2007. Disponible en: <http://prof.usb.ve/ejmarque/cursos/ea2181/core/desp02.html#top>:

MAS, PORRAS. J. 1990. El Sistema Silvícola de Selección (SISISE) para Bosques de Coníferas de la Región Central de México. INIFAP – SARH. 62 pp.

MENDOZA, B. M. A. 1983. Conceptos generales sobre modelaje matemático. In: Primera reunión sobre modelos de crecimiento de árboles y masas forestales. SARH-SF-INIF. Pub. Esp. 44. pp. 35-45.

----- 1993. Conceptos Básicos de Manejo Forestal. Editorial. UTEHA. México, D. F.
161 p.

MOLLES, J. M. C. 2006. Ecología. Trad. de la 3a. ed. en inglés por Esther Yañez Conde. McGraw-Hill. 671 p.

MONÁRREZ, G. J. C. y RAMÍREZ, M. H. 2003. Predicción del rendimiento en masas de densidad excesiva de *Pinus Duranguensis* Mtz. en el estado de Durango. Revista Chapingo. 9 (1): 45-56.

PIENAAR, L. V., y TURNBULL, K. J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanfy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. For. Sci. 19:2-22.

PRODAN, M. 1968. Forest biometrics. Trad. por S. H. Gardiner. Oxford. Pergamon. 447 p.

PRODAN, M. R., PETERS, F. COX., P., REAL. 1997. Mensura forestal. IICA-BMZ/GTZ. San José, Costa Rica. 586 p.

RAMÍREZ, M. H. y ZEPEDA, B. M. 1994. Rendimientos maderables de especies forestales, actualidades de México. In: Memorias de la IV Reunión Nacional de Plantaciones Forestales. SFFS-INIFAP. México. pp. 15-21.

RICHARDS, F. J. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany* 10: 290-300.

RODRÍGUEZ, C. R. 1958. Difusión de fórmulas para el cálculo de la posibilidad maderable y exposición del método mexicano de ordenación de montes de especies de coníferas. Monografía Forestal del Estado de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Mich., México, 118 p.

----- y MENDOZA M., R. 1959. Método Mexicano de Ordenación de Montes. Apéndice 7 del Proyecto Gral. de Ordenación Forestal de la UIEF Michoacana de Occidente. Unidad Industrial de Explotación Forestal Michoacana de Occidente, S. de R.L. Uruapan, Mich. 90 pp.

SEMARNAP-SUBSECRETARÍA DE RECURSOS NATURALES, DIRECCIÓN GENERAL FORESTAL. 1998. Guía técnica para la aplicación del Método Mexicano de Ordenación de Bosques Irregulares. In: Bases científicas para la elaboración de programas de manejo forestal en bosques de coníferas con fines de producción. 16 p.

-----, 1998. Conceptos básicos del manejo integral forestal. In: Bases científicas para la elaboración de programas de manejo forestal en bosques de coníferas con fines de producción. 39 p.

SCHUMACHER, F. J. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *J. For.* 37: 819-820.

SHAPIRO, S. S., A. J. GROSS. 1981. Statistical modeling techniques. Marcel Dekker. New York. 367 p.

SMITH, R. L. y SMITH, T. M. 2001. Ecología. Trad. de la 4a. ed. en inglés por Francesc Mezquita y Eduardo Aparici. Addison Wesley. 664 p.

TORRES, R. J. M. 1999. Sostenibilidad del volumen de cosecha calculado con el Método Mexicano de Ordenación de Montes. Revista Madera y Bosques. 6(2), 2000, Págs. 57-72.

VANCLAY, K. V. 1994. Modelling Forest Growth and Yield: Applications to Mixed Tropical Forests. CAB Int Wallingford, Oxon. UK. 312 p.

VILLA, S. A. B. 1963. Cálculo de incrementos en los bosques de coníferas. Boletín técnico INIF México 11. 36 p.

ZAMUDIO, S. F. J. y AYERDE, L. D. 1997. Modelos de crecimiento. Revista Chapingo. 3 (1): 79-87.

ZEIDE, B. 1993. Analisis of growth equations. Forest Science 39 (3): 594-616.

ZEPEDA, B. E. M. 1983. Análisis de diez procedimientos para estimar incrementos volumétricos de coníferas. Tesis de licenciatura. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Bosques. Chapingo, Méx. 636 p.

----- 1990. Predictor de rendimientos maderables probables de *Pinus patula* Schiede y Deppe., de Perote, Ver., México. Tesis de Maestría en Ciencias. Programa Forestal. CP. Montecillos, Méx. 331 p.

INTECA DIVISION DE CIENCIAS FORESTALES

9. ANEXOS

Anexo 1. Algunos datos generados por las ecuaciones de simulación.

X	Y	Rodal	Dn (cm)	Diam_copa (m)	Altura_total (m)	Alt_FL (m)	Edad (años)	Vol. (m3)
500059	1000648	1	12	3	7	2	13	0.0393
500054	1000644	1	36	6	19	8	32	0.8778
500034	1000645	1	10	2	8	2	12	0.0349
500042	1000637	1	22	5	19	7	20	0.3598
500058	1000665	1	15	4	11	3	15	0.1085
500052	1000658	1	13	4	9	2	14	0.0603
500062	1000648	1	10	3	8	2	12	0.0362
500034	1000648	1	38	5	24	11	34	1.2052
500051	1000660	1	52	6	24	11	58	2.0971
500055	1000636	1	14	3	13	4	15	0.1125
500041	1000662	1	15	3	9	2	15	0.0788
500057	1000638	1	12	3	9	2	13	0.0547
500057	1000663	1	24	4	18	7	21	0.4124
500052	1000665	1	28	6	20	8	24	0.5721
500058	1000659	1	8	1	6	2	11	0.0146
500067	1000654	1	19	4	16	6	17	0.2279
500061	1000645	1	10	2	6	2	12	0.0238
500061	1000649	1	21	4	16	6	19	0.2864
500061	1000640	1	8	2	6	2	11	0.0167
500042	1000656	1	11	2	9	2	13	0.0454
500444	1000646	2	43	6	24	11	41	1.4776
500446	1000658	2	13	2	9	2	14	0.0612
500464	1000649	2	14	3	13	4	14	0.1039
500436	1000655	2	22	5	14	4	19	0.2427
500449	1000667	2	8	2	6	2	11	0.0146
500444	1000638	2	33	7	17	6	28	0.6317
500433	1000651	2	22	4	16	6	20	0.3080
500455	1000633	2	30	7	18	7	26	0.5893
500448	1000656	2	10	3	9	2	12	0.0439
500462	1000663	2	8	1	3	3	11	0.0076
500436	1000648	2	14	4	12	3	14	0.0915
500459	1000643	2	40	6	24	11	36	1.3010
500461	1000662	2	17	4	13	4	17	0.1592
500457	1000657	2	44	6	21	9	43	1.3508
500436	1000643	2	64	7	32	17	111	4.0362
500467	1000649	2	56	6	26	13	72	2.6453
500443	1000644	2	21	4	13	4	19	0.2181
500446	1000653	2	45	6	25	12	45	1.7371
500435	1000643	2	37	6	24	11	33	1.1287
500445	1000649	2	24	4	16	6	21	0.3532
501053	1000643	3	9	2	7	2	12	0.0260
501035	1000641	3	24	5	17	6	21	0.3713
501035	1000655	3	11	3	9	2	13	0.0427
501037	1000645	3	16	3	12	4	16	0.1204
501044	1000660	3	63	7	26	13	103	3.1223

Continuación...

X	Y	Rodal	Dn (cm)	Diam_copa (m)	Altura_total (m)	Alt_FL (m)	Edad (años)	Vol. (m3)
501050	1000644	3	10	2	8	2	12	0.0368
501036	1000654	3	10	2	8	2	12	0.0387
501062	1000652	3	12	2	11	3	13	0.0721
501062	1000650	3	12	3	9	2	13	0.0532
501049	1000648	3	40	6	22	10	36	1.2017
501052	1000662	3	8	1	2	2	11	0.0050
501058	1000654	3	8	1	4	3	11	0.0104
501050	1000666	3	14	3	11	3	14	0.0861
501035	1000649	3	40	7	26	12	36	1.3949
501037	1000652	3	45	7	21	9	44	1.3830
501040	1000636	3	13	2	7	2	14	0.0464
501054	1000643	3	8	1	3	3	11	0.0087
501052	1000654	3	14	4	11	3	14	0.0872
501064	1000643	3	10	2	5	2	12	0.0207
501040	1000656	3	12	3	10	3	13	0.0605
501246	1000051	4	15	4	11	3	15	0.1073
501245	1000042	4	45	8	22	10	44	1.5033
501261	1000059	4	8	1	6	2	11	0.0146
501255	1000036	4	8	1	2	2	11	0.0050
501240	1000039	4	8	2	6	2	11	0.0146
501237	1000062	4	15	3	9	2	15	0.0856
501264	1000057	4	18	5	14	5	17	0.1884
501259	1000055	4	21	5	14	4	19	0.2368
501255	1000046	4	15	3	10	3	15	0.0936
501245	1000062	4	20	5	13	4	18	0.2035
501255	1000044	4	26	5	14	5	23	0.3595
501235	1000047	4	21	4	15	5	19	0.2695
501247	1000050	4	10	3	7	2	12	0.0308
501236	1000044	4	31	5	19	8	27	0.6767
501255	1000049	4	8	1	3	2	11	0.0063
501246	1000053	4	19	5	16	6	18	0.2365
501247	1000063	4	20	4	14	4	18	0.2082
501244	1000042	4	18	5	16	6	17	0.2028
501248	1000053	4	8	2	6	2	11	0.0164
501255	1000036	4	17	5	11	3	17	0.1267
500948	1000462	5	10	3	9	3	12	0.0410
500962	1000449	5	25	5	20	8	22	0.4784
500957	1000460	5	26	6	16	6	22	0.4010
500942	1000445	5	38	6	24	11	34	1.1722
500959	1000463	5	31	6	21	9	27	0.7381
500933	1000448	5	11	2	10	3	13	0.0489
500947	1000449	5	20	5	17	6	18	0.2720
500946	1000453	5	19	4	14	4	17	0.1918
500951	1000435	5	25	6	16	6	22	0.3741
500966	1000456	5	40	6	19	7	36	0.9895
500957	1000453	5	16	4	13	4	15	0.1259
500950	1000446	5	23	6	16	6	20	0.3178
500938	1000440	5	11	3	9	2	13	0.0516
500940	1000458	5	21	4	15	5	19	0.2452

Continuación...

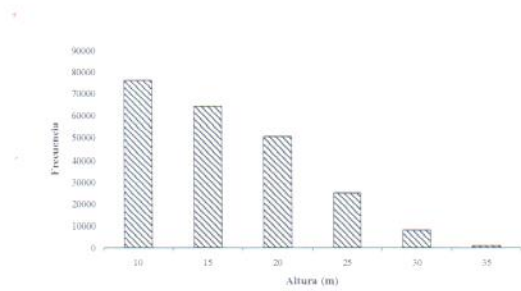
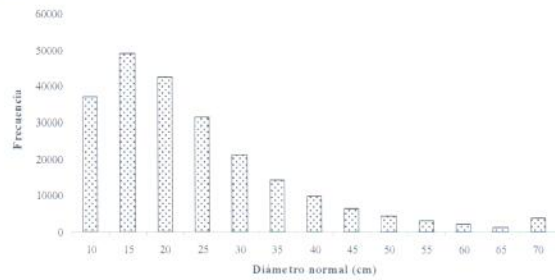
X	Y	Rodal	Dn (cm)	Diam_copa (m)	Altura_total (m)	Alt_FL (m)	Edad (años)	Vol. (m3)
500961	1000444	5	12	3	9	2	13	0.0549
500959	1000449	5	12	3	11	3	13	0.0628
500953	1000467	5	12	3	9	2	13	0.0493
500937	1000450	5	12	3	7	2	13	0.0393
500941	1000460	5	14	4	11	3	14	0.0906
500959	1000436	5	18	4	16	6	17	0.2173
500060	1000348	6	17	3	10	3	16	0.1058
500056	1000348	6	37	6	19	7	33	0.8864
500043	1000348	6	27	5	16	5	24	0.4308
500065	1000357	6	32	6	19	7	27	0.6724
500036	1000355	6	36	6	24	11	31	1.0649
500054	1000364	6	26	4	15	5	22	0.3536
500055	1000336	6	34	6	23	11	30	0.9550
500050	1000340	6	10	2	9	2	12	0.0417
500053	1000353	6	10	3	8	2	12	0.0349
500053	1000338	6	11	3	7	2	13	0.0359
500064	1000341	6	14	3	10	3	14	0.0765
500046	1000333	6	8	1	5	2	11	0.0118
500042	1000351	6	11	3	9	2	13	0.0501
500061	1000345	6	8	1	3	3	11	0.0089
500038	1000342	6	24	6	13	4	21	0.2746
500056	1000337	6	19	4	12	3	17	0.1600
500056	1000366	6	15	3	12	4	15	0.1111
500035	1000341	6	27	4	20	8	23	0.5194
500038	1000345	6	28	6	18	7	24	0.5251
500048	1000340	6	60	7	22	10	86	2.4454
500240	1000036	7	15	3	13	4	15	0.1244
500246	1000051	7	36	6	17	6	32	0.7605
500262	1000038	7	36	5	19	7	31	0.8285
500255	1000049	7	29	6	18	7	25	0.5419
500238	1000057	7	47	7	26	13	47	1.9038
500262	1000059	7	8	2	5	2	11	0.0158
500259	1000060	7	12	2	10	3	13	0.0596
500262	1000054	7	13	3	11	3	14	0.0839
500251	1000055	7	23	5	17	7	20	0.3470
500244	1000041	7	15	3	12	3	15	0.1099
500338	1000042	7	21	5	14	5	19	0.2341
500336	1000043	7	27	5	15	5	24	0.3986
500353	1000045	7	35	7	17	6	30	0.6938
500336	1000051	7	11	3	10	3	13	0.0514
500356	1000058	7	36	6	18	7	32	0.7883
500342	1000063	7	13	3	7	2	14	0.0477
500354	1000063	7	46	6	26	13	45	1.8256
500344	1000042	7	11	3	6	2	13	0.0300
500347	1000045	7	11	2	10	3	13	0.0522
500353	1000056	7	31	6	20	8	27	0.7108
500862	1000057	8	14	3	11	3	15	0.0873
500860	1000050	8	21	5	15	5	19	0.2607
500845	1000053	8	47	7	24	11	48	1.7872

Continuación...

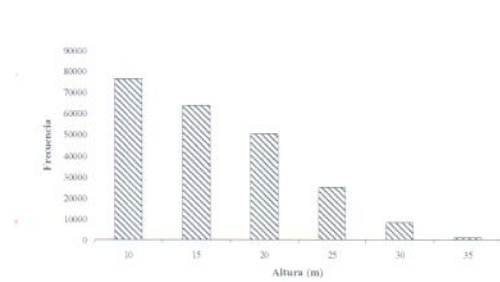
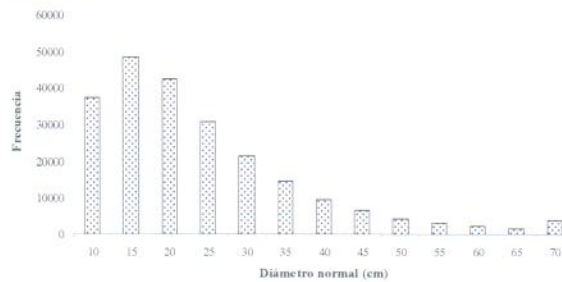
X	Y	Rodal	Dn (cm)	Diam_copa (m)	Altura_total (m)	Alt_FL (m)	Edad (años)	Vol. (m3)
500846	1000063	8	57	8	30	16	74	3.1410
500844	1000041	8	56	9	26	12	73	2.6071
500835	1000042	8	30	6	18	7	25	0.5584
500865	1000058	8	34	7	20	8	29	0.7839
500862	1000052	8	63	8	31	16	110	3.8778
500846	1000062	8	33	7	22	10	29	0.8686
500848	1000041	8	33	7	23	10	29	0.9109
500861	1000043	8	22	4	18	7	19	0.3357
500853	1000058	8	18	4	16	5	17	0.2020
500845	1000040	8	11	3	7	2	13	0.0348
500846	1000042	8	19	5	12	3	17	0.1691
500837	1000038	8	24	4	15	5	21	0.3224
500841	1000045	8	11	3	9	2	13	0.0463
500839	1000058	8	9	2	5	2	12	0.0193
500845	1000064	8	8	1	5	3	11	0.0118
500944	1000063	8	8	1	4	3	11	0.0127
500947	1000060	8	35	7	19	7	30	0.7842

Anexo 2. Comportamiento gráfico de los datos utilizados en la investigación.

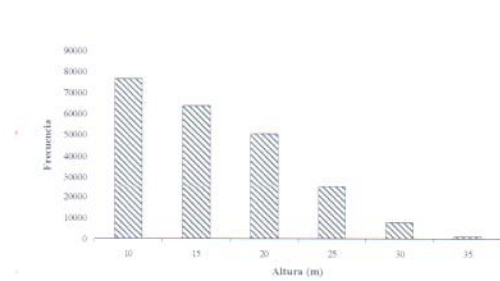
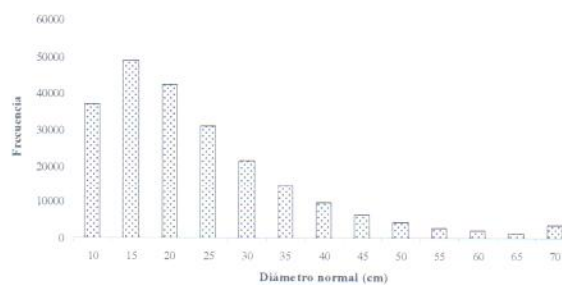
Base 1.



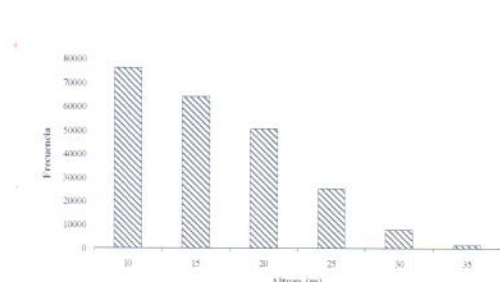
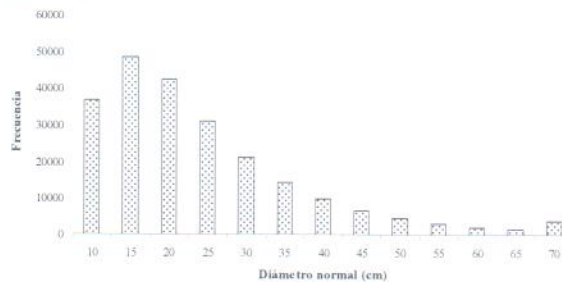
Base 2.



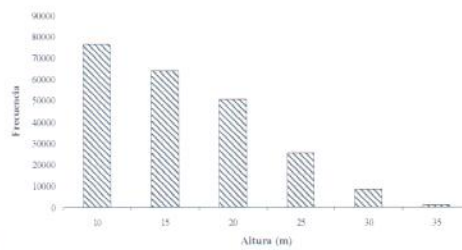
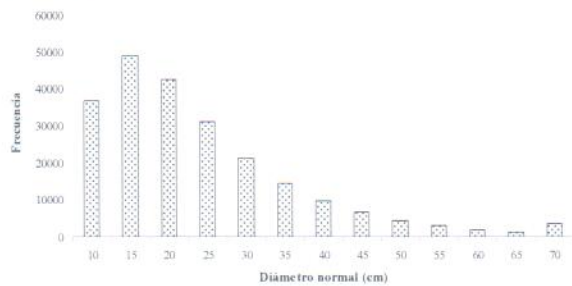
Base 3.



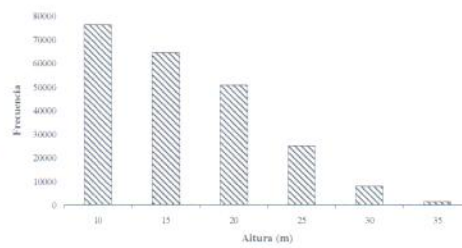
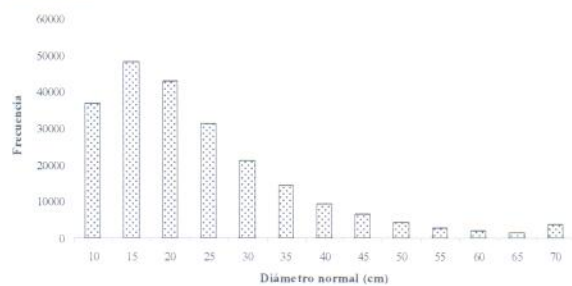
Base 4.



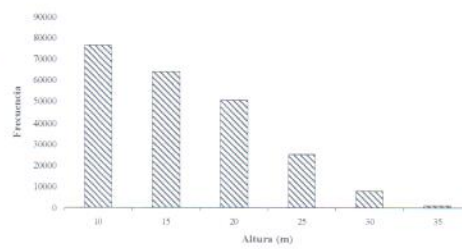
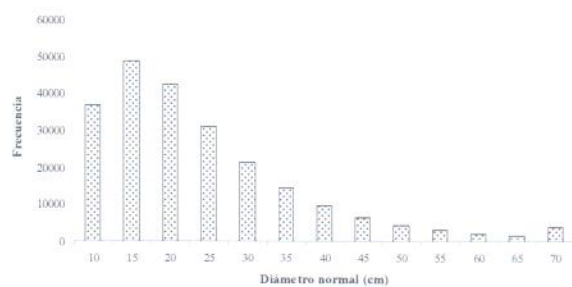
Base 5.



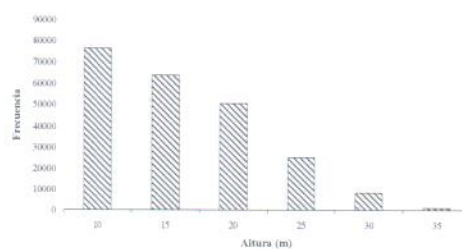
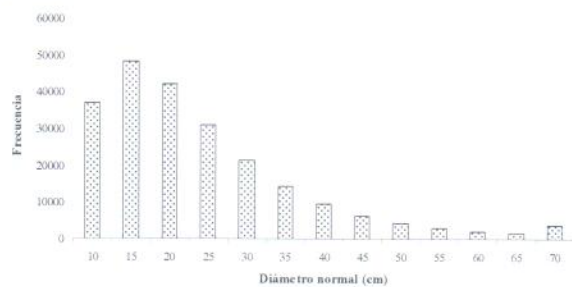
Base 6.



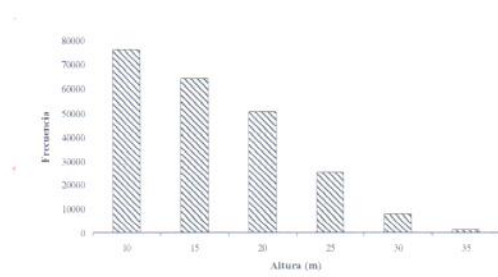
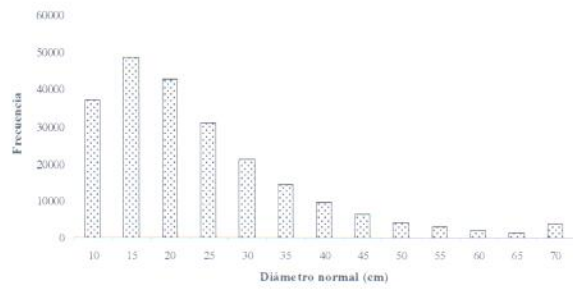
Base 7.



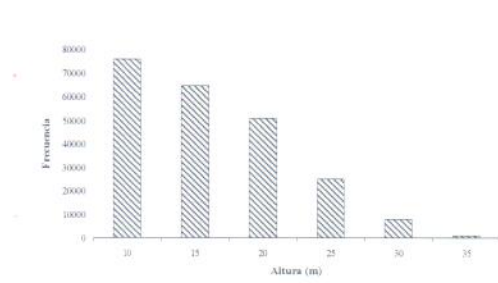
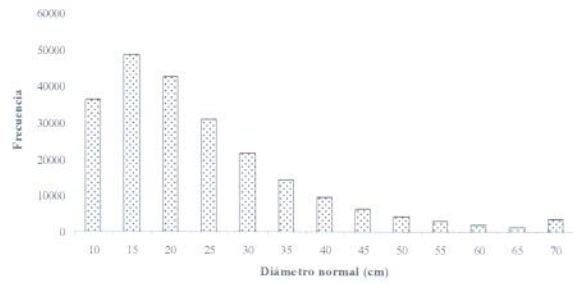
Base 8.



Base 9.



Base 10.



Anexo 3. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 1.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en Icm de diam (m³)	Increment. diam (6)	Increment. anual en vol (m³) (7)	Increment. vol (%) (8)	Vol/ha (9)	Increment. vol/ha (10)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	80	0.0271	0.0777		0.2441			2.1658	
15	50	0.1048	0.1243	0.020	0.2572	0.0052	4.9575	5.2408	0.2598
20	40	0.2291	0.1678	0.029	0.2739	0.0080	3.4923	9.1646	0.3201
25	30	0.3969	0.2302	0.040	0.2461	0.0098	2.4672	11.9077	0.2938
30	20	0.6271	0.2225	0.045	0.2316	0.0105	1.6719	12.5422	0.2097
35	10	0.8496	0.4398	0.066	0.2311	0.0153	1.8012	8.4960	0.1530
40	10	1.2894	0.3117	0.075	0.2076	0.0156	1.2100	12.8937	0.1560
45	10	1.6010	0.3879	0.070	0.2044	0.0143	0.8931	16.0104	0.1430
50	10	1.9889	0.4877	0.088	0.1856	0.0163	0.8172	19.8894	0.1625
55	10	2.4767	0.3981	0.089	0.1727	0.0153	0.6175	24.7665	0.1529
60	10	2.8747	0.2526	0.065	0.1758	0.0114	0.3978	28.7470	0.1144
65	10	3.1273	0.9927	0.125	0.1672	0.0208	0.6660	31.2730	0.2083
70	10	4.1200			0.1583			41.2000	
								ICA (m³)	2.1735

Anexo 4. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 2.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en 1cm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	70	0.0273	0.0768		0.2441			1.9117	
15	50	0.1041	0.1225	0.020	0.2572	0.0051	4.9225	5.2052	0.2562
20	40	0.2266	0.1736	0.030	0.2739	0.0081	3.5799	9.0625	0.3244
25	30	0.4002	0.2197	0.039	0.2461	0.0097	2.4181	12.0061	0.2903
30	30	0.6199	0.2247	0.044	0.2316	0.0103	1.6605	18.5961	0.3088
35	10	0.8446	0.3907	0.062	0.2311	0.0142	1.6838	8.4459	0.1422
40	10	1.2353	0.3803	0.077	0.2076	0.0160	1.2958	12.3532	0.1601
45	10	1.6156	0.3238	0.070	0.2044	0.0144	0.8908	16.1558	0.1439
50	10	1.9394	0.5600	0.088	0.1856	0.0164	0.8460	19.3939	0.1641
55	10	2.4994	0.7176	0.128	0.1727	0.0221	0.8826	24.9944	0.2206
60	10	3.2171	0.4005	0.112	0.1758	0.0197	0.6109	32.1705	0.1965
65	10	3.6176	0.8015	0.120	0.1672	0.0201	0.5557	36.1757	0.2010
70	10	4.4191			0.1583			44.1910	
								ICA (m³)	2.4082

Anexo 5. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 3.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en 1cm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	80	0.0249	0.0830		0.2441			1.9892	
15	50	0.1079	0.1128	0.020	0.2572	0.0050	4.6692	5.3942	0.2519
20	30	0.2207	0.1647	0.028	0.2739	0.0076	3.4441	6.6218	0.2281
25	40	0.3854	0.2579	0.042	0.2461	0.0104	2.6980	15.4167	0.4159
30	20	0.6433	0.2556	0.051	0.2316	0.0119	1.8490	12.8668	0.2379
35	10	0.8990	0.3613	0.062	0.2311	0.0143	1.5857	8.9899	0.1426
40	10	1.2603	0.3589	0.072	0.2076	0.0150	1.1864	12.6027	0.1495
45	10	1.6191	0.3386	0.070	0.2044	0.0143	0.8805	16.1913	0.1426
50	10	1.9578	0.4682	0.081	0.1856	0.0150	0.7650	19.5777	0.1498
55	10	2.4259	0.6770	0.115	0.1727	0.0198	0.8151	24.2594	0.1977
60	10	3.1029	0.0039	0.068	0.1758	0.0120	0.3857	31.0293	0.1197
65	10	3.1068	0.8490	0.085	0.1672	0.0143	0.4591	31.0680	0.1426
70	10	3.9558			0.1583			39.5580	
								ICA (m³)	2.1782

Anexo 6. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 4.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m ³)	Dif_vol/ Clas_diam (m ³)	Vol en 1cm de diam (m ³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m ³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	60	0.0255	0.0804		0.2441			1.5280	
15	50	0.1059	0.1185	0.020	0.2572	0.0051	4.8324	5.2941	0.2558
20	50	0.2244	0.1651	0.028	0.2739	0.0078	3.4622	11.2207	0.3885
25	30	0.3895	0.2081	0.037	0.2461	0.0092	2.3572	11.6859	0.2755
30	20	0.5976	0.2784	0.049	0.2316	0.0113	1.8855	11.9518	0.2254
35	20	0.8760	0.3120	0.059	0.2311	0.0136	1.5572	17.5199	0.2728
40	10	1.1879	0.3822	0.069	0.2076	0.0144	1.2131	11.8795	0.1441
45	10	1.5701	0.3458	0.073	0.2044	0.0149	0.9477	15.7010	0.1488
50	10	1.9159	0.5039	0.085	0.1856	0.0158	0.8233	19.1593	0.1577
55	10	2.4199	0.4304	0.093	0.1727	0.0161	0.6667	24.1986	0.1613
60	10	2.8502	0.5327	0.096	0.1758	0.0169	0.5940	28.5023	0.1693
65	10	3.3830	0.8191	0.135	0.1672	0.0226	0.6683	33.8298	0.2261
70	10	4.2021			0.1583			42.0205	
								ICA (m³)	2.4253

Anexo 7. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 5.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en lcm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	70	0.0274	0.0762		0.2441			1.9197	
15	50	0.1037	0.1161	0.019	0.2572	0.0049	4.7716	5.1826	0.2473
20	40	0.2197	0.1674	0.028	0.2739	0.0078	3.5341	8.7891	0.3106
25	30	0.3871	0.2265	0.039	0.2461	0.0097	2.5038	11.6144	0.2908
30	20	0.6137	0.2818	0.051	0.2316	0.0118	1.9185	12.2736	0.2355
35	20	0.8955	0.3147	0.060	0.2311	0.0138	1.5390	17.9092	0.2756
40	10	1.2101	0.3006	0.062	0.2076	0.0128	1.0557	12.1011	0.1277
45	10	1.5107	0.3937	0.069	0.2044	0.0142	0.9394	15.1074	0.1419
50	10	1.9044	0.6790	0.107	0.1856	0.0199	1.0456	19.0443	0.1991
55	10	2.5835	0.6759	0.135	0.1727	0.0234	0.9056	25.8347	0.2340
60	10	3.2594	0.3315	0.101	0.1758	0.0177	0.5433	32.5940	0.1771
65	10	3.5909	0.5319	0.086	0.1672	0.0144	0.4021	35.9088	0.1444
70	10	4.1228			0.1583			41.2280	
								ICA (m³)	2.3840

Anexo 8. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 6.

Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en 1cm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	70	0.0274	0.0754		0.2441			1.9184	
15	50	0.1028	0.1182	0.019	0.2572	0.0050	4.8446	5.1392	0.2490
20	30	0.2210	0.1704	0.029	0.2739	0.0079	3.5770	6.6306	0.2372
25	30	0.3914	0.2275	0.040	0.2461	0.0098	2.5011	11.7421	0.2937
30	30	0.6189	0.2554	0.048	0.2316	0.0112	1.8073	18.5663	0.3355
35	20	0.8743	0.3796	0.064	0.2311	0.0147	1.6783	17.4859	0.2935
40	10	1.2539	0.4030	0.078	0.2076	0.0162	1.2958	12.5389	0.1625
45	10	1.6568	0.2675	0.067	0.2044	0.0137	0.8272	16.5684	0.1371
50	10	1.9244	0.5126	0.078	0.1856	0.0145	0.7526	19.2439	0.1448
55	10	2.4370	0.3284	0.084	0.1727	0.0145	0.5958	24.3700	0.1452
60	10	2.7654	0.5075	0.084	0.1758	0.0147	0.5313	27.6537	0.1469
65	10	3.2728	1.1074	0.161	0.1672	0.0270	0.8252	32.7283	0.2701
70	10	4.3803			0.1583			43.8025	
								ICA (m3)	2.4154

Anexo 9. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 7.

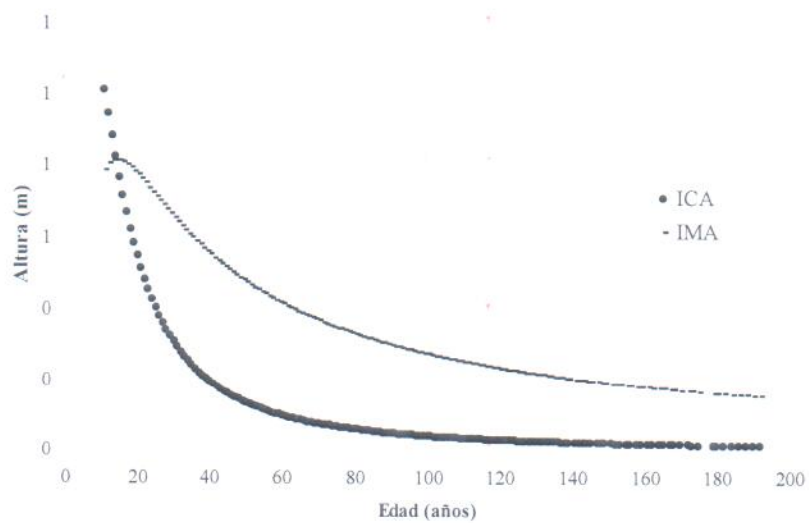
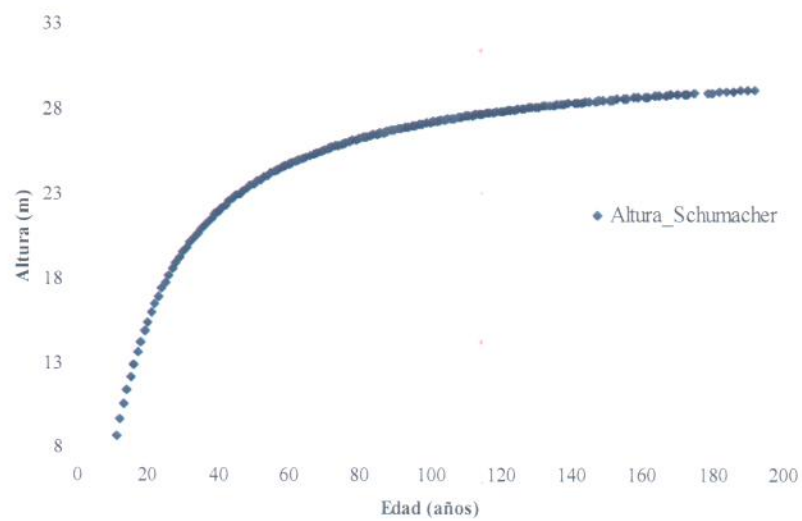
Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en 1cm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	70	0.0285	0.0751		0.2441			1.9961	
15	50	0.1036	0.1282	0.020	0.2572	0.0052	5.0458	5.1807	0.2614
20	40	0.2318	0.1678	0.030	0.2739	0.0081	3.4977	9.2719	0.3243
25	30	0.3996	0.1905	0.036	0.2461	0.0088	2.2062	11.9879	0.2645
30	20	0.5901	0.3103	0.050	0.2316	0.0116	1.9659	11.8017	0.2320
35	20	0.9004	0.2844	0.059	0.2311	0.0137	1.5263	18.0085	0.2749
40	10	1.1849	0.4805	0.076	0.2076	0.0159	1.3405	11.8486	0.1588
45	10	1.6654	0.3901	0.087	0.2044	0.0178	1.0686	16.6539	0.1780
50	10	2.0555	0.3014	0.069	0.1856	0.0128	0.6246	20.5554	0.1284
55	10	2.3570	1.1679	0.147	0.1727	0.0254	1.0764	23.5696	0.2537
60	10	3.5249	-0.2618	0.091	0.1758	0.0159	0.4519	35.2490	0.1593
65	10	3.2632	0.6521	0.039	0.1672	0.0065	0.2000	32.6315	0.0653
70	10	3.9152			0.1583			39.1520	
								ICA (m3)	2.3005

Anexo 10. Cálculo del incremento por el Método Loetsch del Rodal 8.

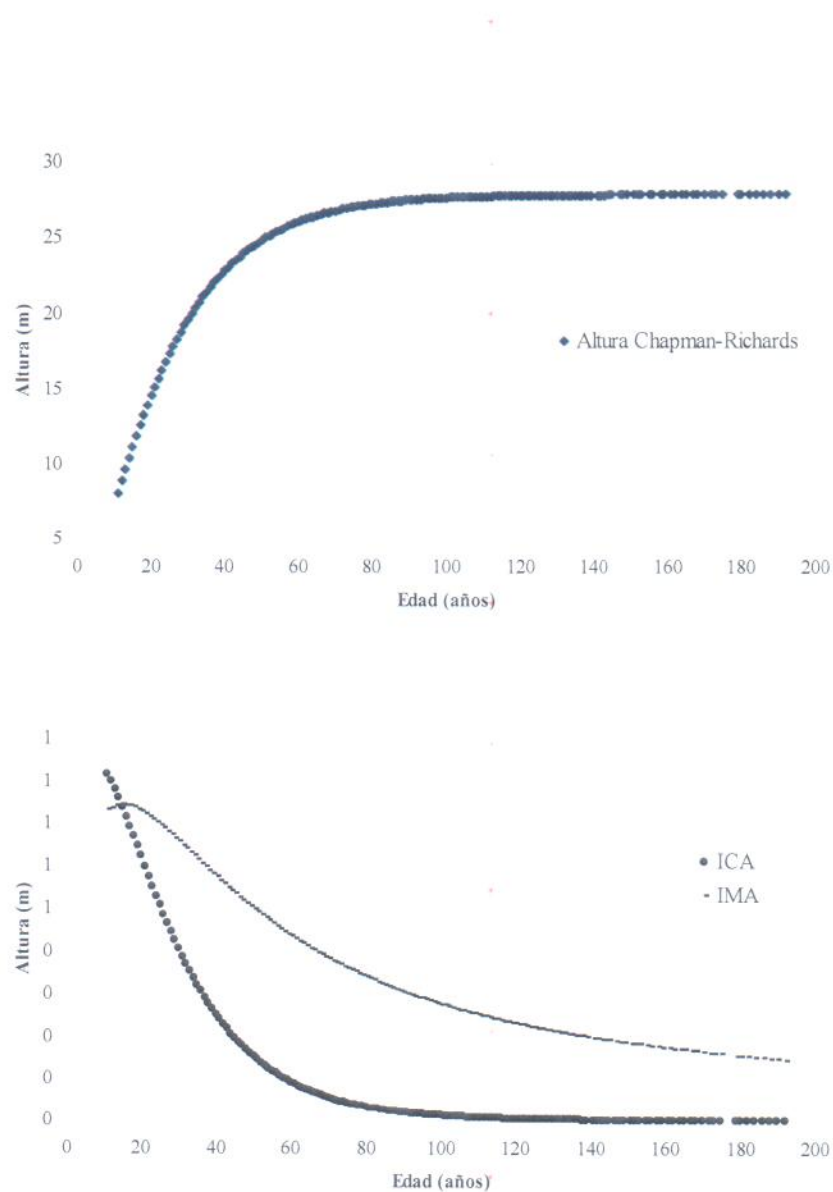
Cat diam	Núm. Árb/ha	Vol_prom (m³)	Dif_vol/ Clas_diam (m³)	Vol en 1cm de diam (m³)	Increment. diam	Increment. anual en vol (m³)	Increment. vol (%)	Vol/ha	Increment. vol/ha
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
10	70	0.0269	0.0735		0.2441			1.8833	
15	60	0.1004	0.1275	0.020	0.2572	0.0052	5.1487	6.0237	0.3101
20	40	0.2279	0.1638	0.029	0.2739	0.0080	3.5018	9.1155	0.3192
25	30	0.3917	0.2299	0.039	0.2461	0.0097	2.4730	11.7519	0.2906
30	20	0.6216	0.2256	0.046	0.2316	0.0105	1.6971	12.4322	0.2110
35	10	0.8472	0.4024	0.063	0.2311	0.0145	1.7127	8.4718	0.1451
40	10	1.2495	0.2543	0.066	0.2076	0.0136	1.0912	12.4954	0.1363
45	10	1.5039	0.4511	0.071	0.2044	0.0144	0.9589	15.0387	0.1442
50	10	1.9550	0.3772	0.083	0.1856	0.0154	0.7865	19.5501	0.1538
55	10	2.3322	0.4676	0.084	0.1727	0.0146	0.6254	23.3219	0.1459
60	10	2.7997	0.6904	0.116	0.1758	0.0204	0.7270	27.9974	0.2035
65	10	3.4901	0.5994	0.129	0.1672	0.0216	0.6180	34.9013	0.2157
70	10	4.0895			0.1583			40.8950	
								ICA (m3)	2.2755

Anexo 11. Cálculo de la posibilidad de volumen a extraer del predio mediante el MMOM.

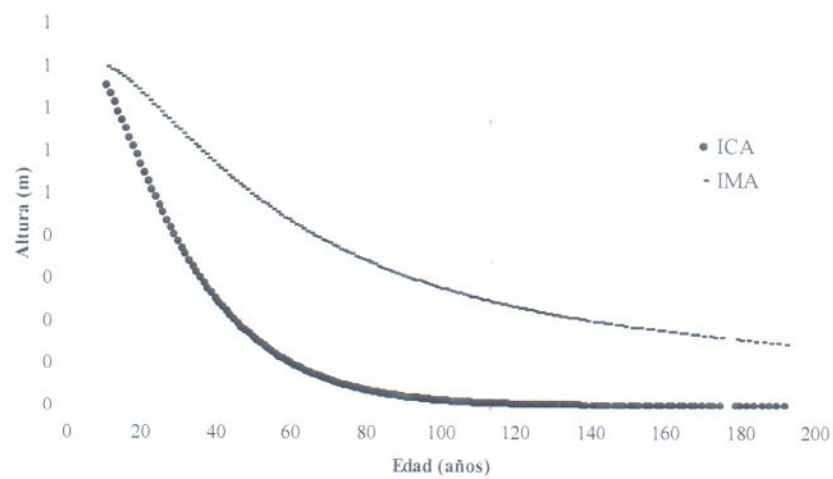
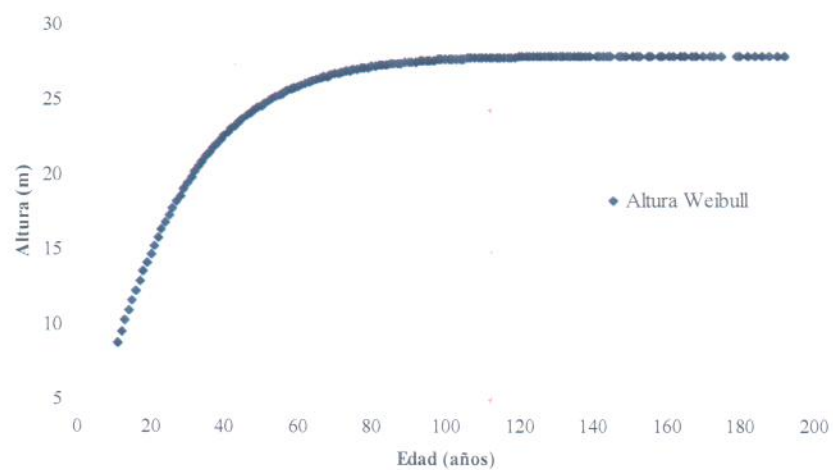
Rodal	Sup. (has)	ER/ha m3 V.T.A.	ERT m3 V.T.A	Intensidad de corta (%)	Posibilidad (m3/ha)	Posibilidad total (m3)	Vol. residual (m3/ha)	Vol. Residual total (m3)	ICA (m3)	ICA (%)	Ciclo corta	Volumen final
1	20.50	118.8724	2,436.8845	30	35.6535	730.8975	83.2189	1,705.9870	2.1735	0.0183	20	2,436.8845
2	20.20	119.3297	2,410.4593	30	35.7793	722.7411	83.5504	1,687.7182	2.4082	0.0202	18	2,410.4593
3	19.00	110.5385	2,100.2324	30	33.1556	629.9561	77.3830	1,470.2763	2.1782	0.0197	18	2,100.2324
4	22.30	118.4661	2,641.7937	30	35.5273	792.2588	82.9388	1,849.5349	2.4253	0.0205	18	2,641.7937
5	14.10	120.5422	1,699.6444	30	36.1606	509.8644	84.3816	1,189.7800	2.3840	0.0198	18	1,699.6444
6	19.00	122.2076	2,321.9443	30	36.6554	696.4520	85.5522	1,625.4923	2.4154	0.0198	18	2,321.9443
7	16.50	118.6944	1,958.4570	30	35.6046	587.4766	83.0897	1,370.9804	2.3005	0.0194	18	1,958.4570
8	18.40	117.9952	2,171.1112	30	35.3937	651.2448	82.6014	1,519.8664	2.2755	0.0193	19	2,171.1112
17,740.5268								12,419.6355				17,740.5268
							5,320.8913					



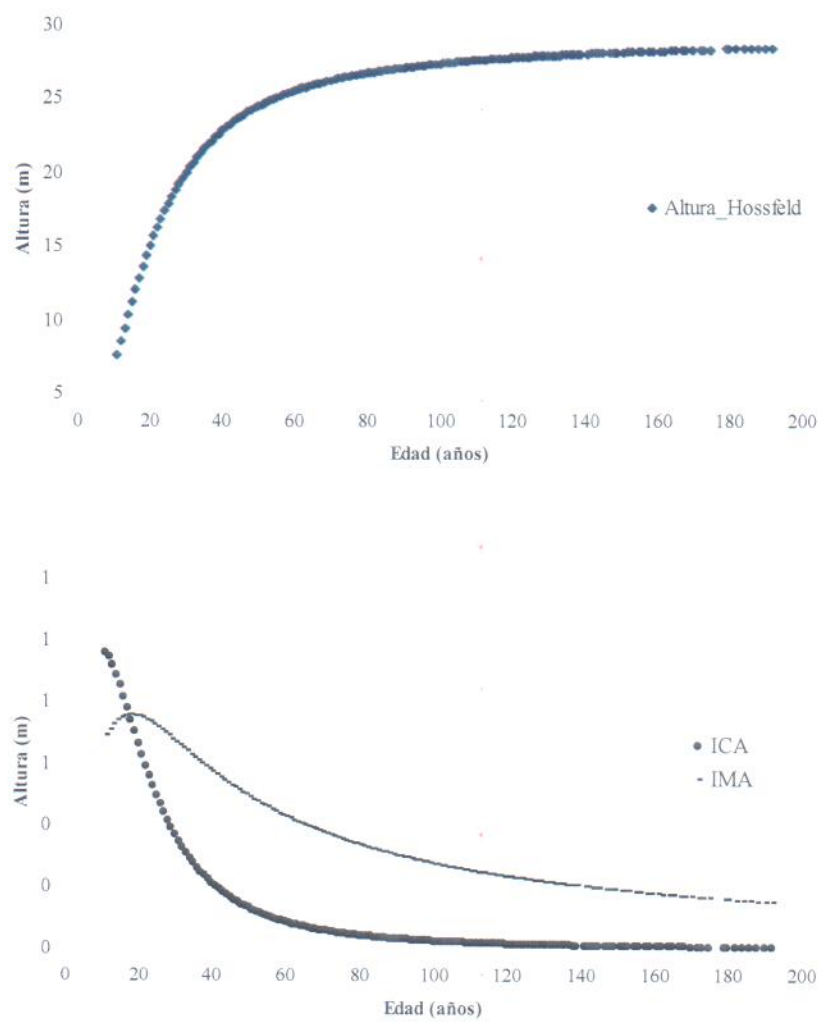
Anexo 12. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Schumacher.



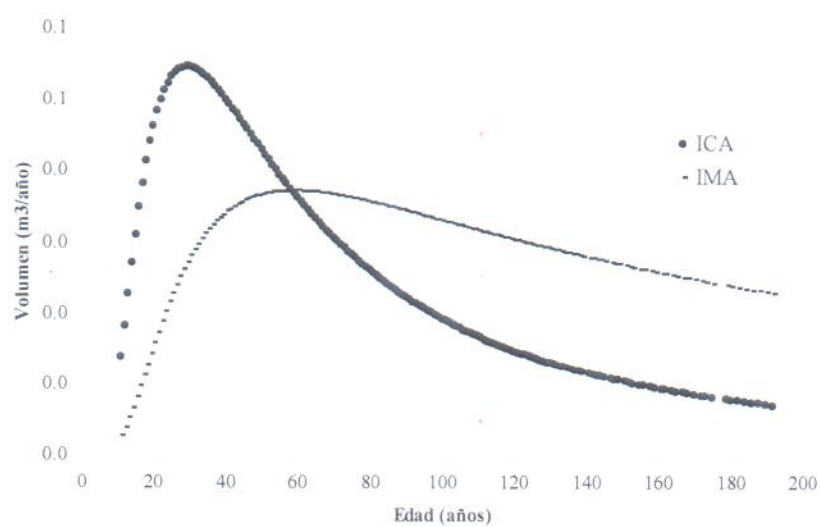
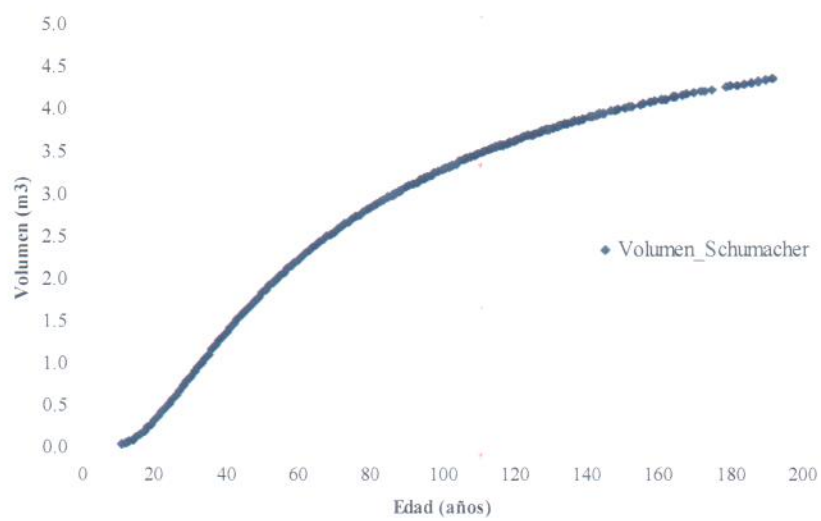
Anexo 13. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Chapman-Richards.



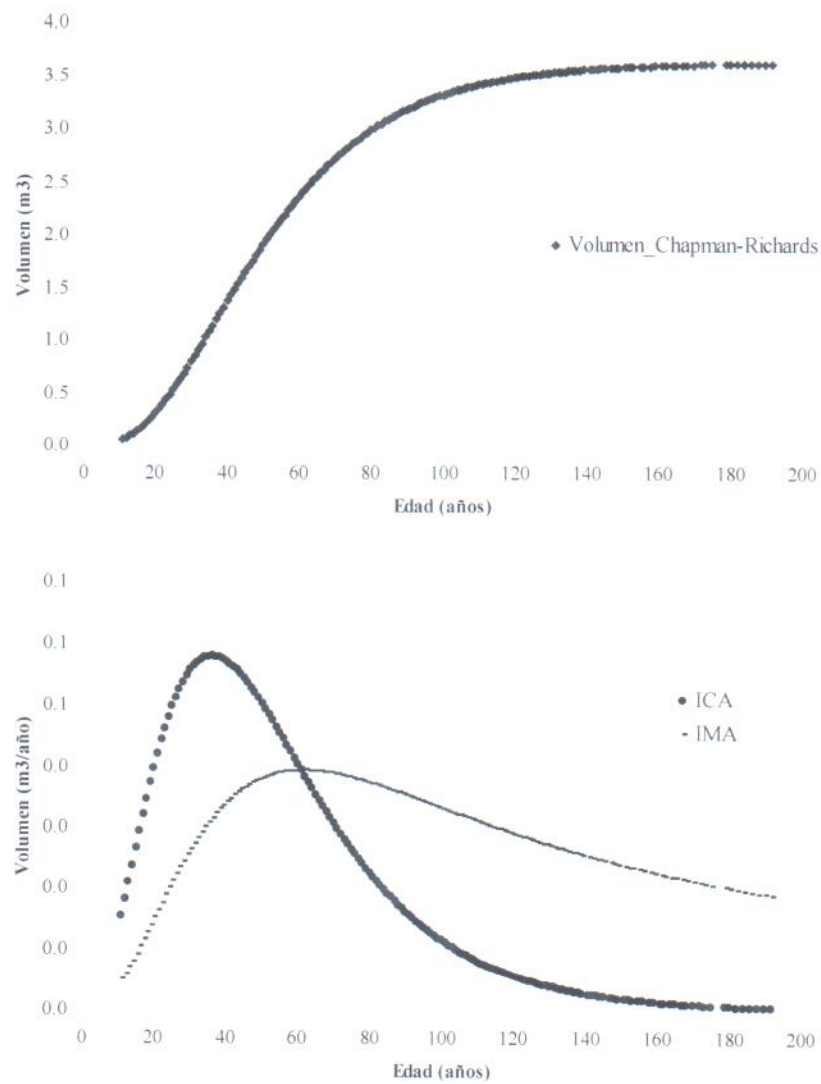
Anexo 14. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Weibull.



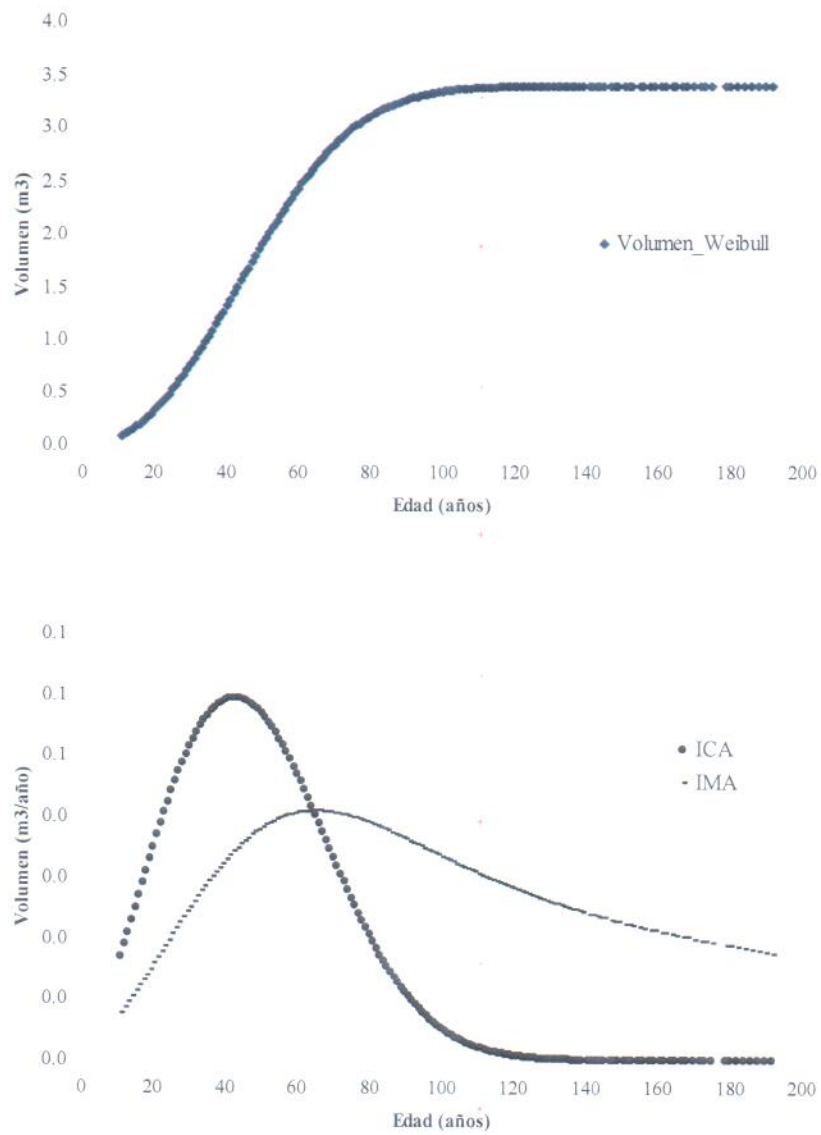
Anexo 15. Patrón de crecimiento e incremento en altura del arbolado, empleando modelo Hossfeld.



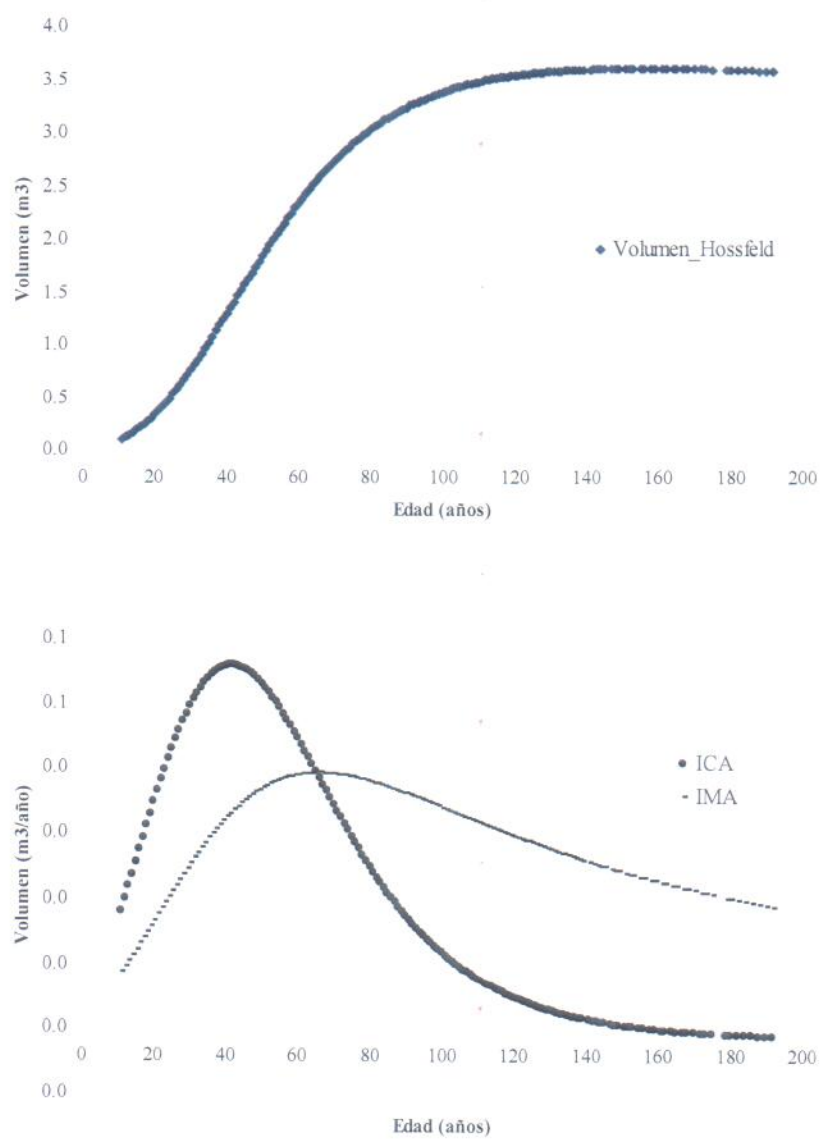
Anexo 16. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Schumacher.



Anexo 17. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Chapman-Richards.



Anexo 18. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Weibull.



Anexo 19. Patrón de crecimiento e incremento en volumen del arbolado, empleando modelo Hossfeld.