

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA



Determinación de Turno e Índice de Sitio para *Pinus montezumae* Lamb., en el Sureste del Estado de Hidalgo.

Por:

ADRIÁN HERNÁNDEZ RAMOS

T E S I S

Presentada como requisito parcial para
obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Mayo, 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Determinación de Turno e Índice de Sitio para *Pinus montezumae* Lamb., en el Sureste del Estado de Hidalgo.

Por:

ADRIÁN HERNÁNDEZ RAMOS


Tesis


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada:


MC. Celestino Flores López
Asesor principal


MC. José Aniseto Díaz Baldéras
Coasesor


Ing. David Díaz Hernández
Coasesor


Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación
Saltillo, Coahuila, México de Agronomía
Mayo, 2012

Este proyecto de tesis ha sido financiado y apoyado por el Proyecto de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con clave No.02-03-0207-2192, a cargo del profesor investigador M.C. Celestino Flores López. También el proyecto fue apoyado por la Corporación Agroforestal y Ambiental S. P. R. de R. I., localizada en Tulancingo, Hidalgo y encargada del manejo forestal de algunas áreas forestales del Estado.

DEDICATORIA

A DIOS PADRE:

Por regalarme la vida y salud para poder lograr mis metas en esta vida, así como por permitirme agrandar mis conocimientos en cuanto a mi carrera de Forestal, relacionarme con mis amigos y por tener a mis padres conmigo.

A MIS PADRES:

Reyna Ramos Murcia y Alejandro Hernández Cárdenas por brindarme todo el apoyo posible para que yo pudiera superarme profesionalmente y como persona honorable ante la sociedad. Por haber participado en la elaboración de esta investigación, con sus horas de cansancio y trabajo hicieron posible llevar a cabo este trabajo.

A MIS HERMANOS:

Ing. Jonathan Hernández Ramos y Alejandro Hernández Ramos por estar siempre a mi lado apoyándome en lo bueno y lo malo, así como en la participación para la elaboración de esta tesis. Por ser hermanos ejemplares que juntos realizaremos grandes logros.

A MIS ABUELOS:

Margarita, Bernardo (abuelos maternos), Ángela y J. M. Telésforo (†) (abuelos paternos) por brindarme su amor y sus conocimientos de esa experiencia que han forjado toda su vida y que es muy importante para mí.

A MI FAMILIA EN GENERAL:

A mis tíos, primos, sobrinos y demás familia que siempre estuvieron animándome para seguir adelante.

A MIS AMIGOS:

Que junto a mi estuvieron viviendo las experiencias que nos trajo la vida en la universidad, todos saben quiénes se consideran mis amigos.

A MIS VECINOS DE SALTILLO:

Por estar al pendiente de mí en cualquier cosa y cuidándome de no irme por mal camino, así en ofrecerme su hospitalidad.

AGRADECIMIENTOS

A la Telesecundaria 30, Lic. Benito Juárez García, en Singuilucan, Hidalgo, por enseñarme el camino del conocimiento e iniciar mi formación como persona profesional.

Al Centro de Educación y Capacitación Forestal No. 1, Dr. Manuel Martínez Solórzano, Uruapan, Michoacán por transferirme los conocimientos de la carrera forestal y permitirme seguir con mi formación profesional, que fue un escalón más.

A mi *Alma Mater* Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por dejarme tener la dicha de estudiar en esta máxima casa de estudios y por darme el conocimiento para poder enfrentarme al campo.

Al Departamento Forestal y a toda la plantilla de maestros y administrativos que siempre se han preocupado por que aprenda y por mi superación personal, así como la amistad que tengo con muchos de ellos.

Al M.C. Celestino Flores López Profesor Investigador de Depto. Forestal de la UAAAN, primero por ser uno de los mejores profesores de la Universidad, por brindarme el apoyo como maestro en clases, asesorías de tesis, tiempo invertido en mis conocimientos y por la amistad como amigos que me ha brindado.

Al M.C. José Aniceto Días Balderas Profesor Investigador de Depto. Forestal de la UAAAN, por ser un gran maestro y brindarme su apoyo y dedicación como asesor de esta Tesis, también por la amistad de profesores-amigos que ha permitido.

Al M.C. Andrés Nájera Díaz Profesor Investigador de Depto. Forestal de la UAAAN, por brindarme sus conocimientos y por el apoyo moral con sus consejos y experiencias.

Al Ing. David Díaz Hernández prestador de servicios técnicos forestales en la COAFA S. P. R. de R. I., por brindarme su apoyo y dedicación en la elaboración de este trabajo de tesis, en la parte de la recolección de las muestras y revisión del escrito.

A la Corporación Agroforestal y Ambiental S. P. R. de R. I. (COAFA) y a toda su plantilla de trabajo, Dr. Ramón, Ing. Miguel, Ing. Manuel, Ing. Nahum, Ing. Lucio, Ing. David, Ing. Armando, Ing. Fabián y Tec. Forestal Erasmo, por el apoyo para realizar este trabajo y poder desarrollarme en el trabajo profesional.

A los ejidos Singuilucan, Sabanetas y Santo Tomás, por haberme permitido utilizar su recurso forestal para realizar este trabajo de investigación.

A todos mis amigos que estuvieron presentes y junto con ellos pude realizar este trabajo muchas gracias a todos.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	3
1.2. Objetivos específicos	3
2 REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Descripción de la especie	4
2.2 Crecimiento de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	6
2.3 Calidad de estación.....	6
2.4 Índice de sitio	7
2.5 Métodos de construcción de funciones de índice de sitio	8
2.6 Curvas anamórficas y polimórficas.....	9
2.7 Modelos de crecimiento	9
2.8 Turno	11
2.9 Tipos de turno	12
2.10 Determinación del turno.....	13
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
3.1 Descripción del área de estudio	14
3.1.1 Ubicación	14
3.1.2 Clima.....	14
3.1.3 Suelo.....	16
3.1.4 Vegetación.....	16
3.1.5 Hidrología	17
3.2 Análisis troncal	17
3.2.1 Marqueo del arbolado	17
3.2.2 Muestreo y elección del arbolado	18
3.2.3 Colecta de rodajas	19
3.2.4 Determinación de la edad del renuevo.....	19
3.2.5 Preparación de las muestras	20

	Página
3.2.6 Evaluación y toma de datos	20
3.2.7 Procesamiento de datos de análisis troncal.....	21
3.3 Determinación de turno.....	23
3.3.1 Modelos de crecimiento	23
3.3.2 Cálculo del incremento corriente anual	24
3.3.3 Cálculo del incremento medio anual	25
3.3.4 Determinación del turno absoluto de la especie.	25
3.3.5 Determinación del turno técnico	26
3.3.6 Distribución de productos en relación al turno técnico	26
3.4 Determinación de la calidad de sitio para la especie de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	27
3.4.1 Selección del arbolado suprimido.....	27
3.4.2 Modelo de crecimiento e incremento utilizado para la determinación de las curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio.....	27
3.4.3 Determinación de la edad base	28
3.4.4 Construcción de la familia de curvas con el método anamórfico	29
3.4.5 Construcción de la familia de curvas con el método polimórfico.....	30
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
4.1 Determinación de turno.....	32
4.1.1 Crecimiento e incremento en diámetro.....	32
4.1.2 Crecimiento e incremento en altura.....	33
4.1.3 Crecimiento e incremento en área basal (m ²).....	37
4.1.4 Crecimiento e incremento en volumen	38
4.1.5 Comparación de turnos y distribución de productos a diferentes edades .	40
4.2 Determinación de índice de sitio	43
4.2.1 Determinación de la edad base	44
4.2.2 Curvas anamórficas de índice de sitio para <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	46
4.2.3 Curvas polimórficas de índice de sitio para <i>Pinus montezumae</i> Lamb.....	48
5 CONCLUSIONES.....	52
6 RECOMENDACIONES	53
7 LITERATURA CITADA.....	54
APÉNDICE	60

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Modelos con mejores resultados en la predicción de calidad de estación e índice de sitio para especies de coníferas.	11
Cuadro 2. Localización geográfica de los diferentes ejidos donde se colectaron las muestras para el análisis troncal.	14
Cuadro 3. Descripción de climas por municipio del área de estudio.	16
Cuadro 4. Áreas de extracción de muestras para análisis troncal por ejido.	18
Cuadro 5. Localidades evaluadas y número de muestra por ejidos.	19
Cuadro 6. Modelos de crecimiento utilizados para la estimación de diámetro, altura, área basal y volumen.	24
Cuadro 7. Porcentaje de distribución de productos en el aprovechamiento maderable para <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	26
Cuadro 8. Cuadro de comparación de turnos técnicos con el turno absoluto del arbolado.	33
Cuadro 9. Cuadro de comparación de turnos técnicos con el turno absoluto del arbolado en relación a la altura.	37
Cuadro 10. Comparación de la producción de turno absoluto y turno técnico, en relación a un diámetro establecido como medida de corta (30, 35 y 40 cm).	40
Cuadro 11. Calidades de estación, valores de índice de sitio (is) y el rango de amplitud de cada calidad a una edad de 35 años para <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	47
Cuadro 12. Calidades de estación, valores de índice de sitio (is) y el rango de amplitud de cada calidad a una edad de 35 años para <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Fenología de la especie de <i>Pinus montezumae</i> Lamb., árbol joven o regeneración (izquierda) y árbol adulto (derecha). Fotos tomadas el 06 de abril del 2010 por Adrián Hernández Ramos en el ejido Santo Tomás, Zempoala, Hidalgo.....	5
Figura 2. Mapa de localización geográfica del área de estudio y de cada ejido evaluado.	15
Figura 3. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de diámetro y curvas de ICA e IMA en relación a la variable diámetro. Las líneas punteadas representan el punto en el que se encuentra el turno absoluto.....	34
Figura 4. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de altura y curvas de ICA e IMA en relación a la variable altura. Las líneas punteadas representan el punto en el que se encuentra el turno absoluto.	36
Figura 5. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de área basal y curvas de ICA e IMA en relación a la variable área basal. Las líneas punteadas representan el punto donde se encuentra el turno absoluto.	39
Figura 6. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de volumen y curvas de ICA e IMA en relación a la variable volumen. Las líneas punteadas representan el punto donde se encuentra el turno absoluto.....	41
Figura 7. Curva de ajuste para diámetro (superior izquierda), altura (superior derecha) y volumen (inferior centro) con los diferentes turnos técnicos comparados con el turno absoluto de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.....	42
Figura 8. Curva guía obtenida con el modelo ajustado para la creación de la familia de curvas.	43

	Página
Figura 9. Curvas de ICA e IMA mostrando un cruce a los 35 años valor de edad base.....	44
Figura 10. Curva guía interceptada por la línea tangente en el punto de 35 años, marcado como la edad base de <i>Pinus montezumae</i> Lamb.	45
Figura 11. Familia de curvas anamórficas de índice de sitio para <i>Pinus montezumae</i> Lamb., a una edad base de 35 años y una amplitud de dos metros entre curva.	47
Figura 12. Familia de curvas polimórficas de índice de sitio para <i>Pinus montezumae</i> Lamb., a una edad base de 35 años.	50

RESUMEN

En el presente estudio se estimó el turno e índice de sitio de *Pinus montezumae* Lamb., para la región sureste del Estado de Hidalgo, utilizando la metodología de análisis troncal de 40 árboles procedentes de los ejidos de Santo Tomás, Sabanetas y Singuilucan. Para estimar el turno se utilizaron los modelos de Schumacher, Chapman-Richards, Weibull y Korf analizados para las variables diámetro, altura, área basal y volumen en relación con la edad. Para la determinación del índice de sitio se utilizaron 36 árboles, se utilizó el modelo de Schumacher para el análisis de edad-altura y en la construcción de la familia de curvas anamórficas y polimórficas a una edad base determinada. Se obtuvieron turnos para cada variable como es el caso del diámetro donde presentó un turno absoluto de 41, para altura 42, en área basal 104 y para volumen 110 años, tomando como base el diámetro y la altura se realizó una distribución de productos a diferentes edades, estableciendo así el turno técnico a 30, 35 y 40 cm de diámetro y recomendado para la especie.

Para índice de sitio a una edad base de 35 años se construyeron la familia de curvas anamórficas obteniendo cinco curvas a una equidistancia de dos metros, con los valores de calidad de estación de 18.74 (I), 16.74 (II), 14.74 (III), 12.74 (IV) y 10.74 (V) metros y la familia de curvas polimórficas a la misma edad base a una equidistancia de tres metros donde se obtuvieron también cinco curvas con los valores de calidad de estación de 20.74 (I), 17.74 (II), 14.74 (III), 11.74 (IV) y 8.74 (V).

Palabras clave: Turno absoluto, índice de sitio, calidad de estación, curvas anamórficas, curvas polimórficas.

ABSTRACT

In this study was estimated the turn and site index for *Pinus montezumae* Lamb. to southeast region of the state of Hidalgo, the analysis stem methodology was used in 40 trees from the ejidos of Santo Tomas, Singuilucan and Sabanetas. To estimate the turn was used the models Schumacher, Chapman-Richards, Weibull and Korf to analyze the diameter, height, basal area and volume variables in relation to age. In the determination of the site index were used 36 trees, Schumacher model was used for analyzing age-height and in the construction of the family of curves anamorphic and polymorphic at a given base age. Turns were obtained for each variable as is the case where the diameter presented an absolute turn of 41, 42 to height, 104 to basal area and 110 years to volume, considering the diameter and height was made a distribution of products to different ages, the technical turns established were 30, 35 and 40 cm of diameter and recommended for the species.

To the site index were built the family of curves anamorphic at base age of 35 years, five curves were obtained at an equidistance of two meters, with values of site index of 18.74 (I), 16.74 (II), 14.74 (III), 12.74 (IV) and 10.74m (V) and the family of curves polymorphic the same age based and curves with a equidistance of three meters, the values obtained of site index were of 20.74 (I), 17.74 (II), 14.74 (III), 11.74 (IV) and 8.74 m (V).

Keywords: absolute turn, site index, forest site quality, anamorphic curves, polymorphic curves

1 INTRODUCCIÓN

En los bosques de México se han identificado cincuenta y dos especies de pino, lo que representa la más amplia diversidad de especies de pino en el mundo (Franco *et al.* 2003). Dentro de las especies de *Pinus* de mayor importancia en el manejo forestal en el estado de Hidalgo se encuentra el *Pinus montezumae* Lamb., que tiene un buen desarrollo y una amplia distribución en los bosques de clima templado en el centro y sureste de dicho Estado. Presenta amplia distribución natural en la República Mexicana y es una especie de aprovechamiento maderable, sobre todo en el Eje Neovolcánico (Zamora *et al.*, 2007).

Pinus montezumae Lamb., aunque no es una especie de carácter endémico en la región centro de México, ya que se desarrolla desde el norte del país (parte de Coahuila, en la Sierra de Arteaga, en Nuevo León y Tamaulipas) hasta el estado de Chiapas, por lo que se puede considerar como una de las especies más importantes del país, debido a su capacidad de adaptación a una gran cantidad de condiciones del medio (Rodríguez, 1997).

Pero cuyas características no son aún lo suficientemente conocidas para contar con las bases necesarias que permitan ampliar la silvicultura más eficiente y propicie un óptimo aprovechamiento de los mismos, es decir, no se conocen las características de desarrollo ni los hábitos de vida y crecimiento de los árboles y masas forestales (Aguilar, 1997). Debido a esto, en el aprovechamiento de los recursos forestales, generalmente la producción maderable es la de mayor importancia y depende de la calidad del sitio, es decir, la productividad de un área dada. Sin embargo, la calidad de los productos y la utilización plena del potencial del sitio, dependen del manejo adecuado de la densidad del rodal a través del turno, así como también constituye una fuente importante de ingreso económico para los habitantes de las comunidades forestales de estos municipios, además de realizar un manejo sostenido de los recursos, garantizando su permanencia a largo plazo (Rodríguez *et al.*, 2009).

Pero lamentablemente en algunas zonas boscosas, la aplicación de técnicas básicas para el manejo forestal se encuentra bastante reducida, ya sea por la falta de recursos económicos o por desconocimiento de su aplicación. La calidad de sitio es una de las herramientas básicas que permite tomar en cuenta la capacidad productiva del bosque ya que intervienen factores como el suelo y la vegetación, siendo la calidad el resultado de la interacción entre dichos factores (Benavides y Manzanilla, 1993), por lo antes mencionado las curvas de índice de sitio sirven para clasificar los terrenos en función de su capacidad productiva para una especie forestal específica (Jerez *et al.* 2011).

Para determinar la calidad de estación se ha recurrido a la utilización del Índice de sitio, el cual se define como la máxima altura que alcanza un bosque a una edad determinada o edad base. Esta última se determina cuando los incrementos corriente anual y medio anual en altura, se interceptan (Monroy, 1996). La altura de los árboles dominantes en el rodal se utilizan como indicador de productividad, ya que es independiente de la densidad del rodal y del manejo, siempre y cuando los aclareos y las podas no sean intensas (Zepeda y Rivero, 1984), este parámetro como criterio para clasificar los rodales de acuerdo con la capacidad productiva de los lugares, puede ser utilizada en el caso de las especies heliófitas, que forman masas coetáneas, con un dosel uniforme (Mora y Meza, 2003).

La tasa de crecimiento en altura dominante y la magnitud absoluta que logra alcanzar esta característica, a una edad determinada, pueden variar ampliamente de una localidad a otra dependiendo, en primera instancia, de la calidad de sitio. Las diferentes combinaciones que se pueden dar de los diversos factores ambientales, influyen en grado distinto sobre la capacidad productiva de los lugares, produciendo una gradación dentro de todo el intervalo posible de sitios; lo que permite definir desde las mejores localidades hasta las más pobres (Mora y Meza, 2003).

La calidad de sitio permite distinguir distintos niveles de incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) en volumen, con lo que es posible definir la edad a la que ocurre el turno técnico, es decir, la edad óptima de cosecha del rodal si se desea maximizar el volumen total (la edad cuando $ICA=IMA$) (Santiago, 2009). También obteniendo estos incrementos para los parámetros de DAP, altura y volumen

podemos observar el turno absoluto (Corral y Návar, 2005). Por lo anterior es importante calcular los dos parámetros epidemícos, ya que depende uno de otro para obtener mejores resultado y valores reales sobre el turno técnico y calidad de estación en la región del Estado de Hidalgo para mejorar las técnicas de aprovechamiento forestal de esta especie de estudio.

Otra técnica importante para el manejo forestal a parte de la calidad de sitio es el turno que se puede definir como la vida óptima de una masa forestal (turno óptimo). Así, puede entenderse por turno óptimo el que corresponde a la vida de la masa, o edad a la que se alcanza la máxima producción, o aquel turno que se corresponda a la máxima productividad media de la masa forestal (Díaz, 1997).

Este documento tiene como propósito determinar turno y la calidad de sitio para la especie de *Pinus montezumae* Lamb., en la región sur del Estado de Hidalgo, abarcando los municipios de Singuilucan y Zempoala, dentro de estos municipios se encuentran el Ejido Singuilucan, Ejido Sabanetas y Ejido Santo Tomás, en este sentido, los resultados apoyarán los estudios futuros sobre aprovechamiento de esta especie en la región.

1.1. Objetivo general

Determinar el turno e índice de sitio a partir de análisis troncal para la especie de *Pinus montezumae* Lamb., en la región sureste del Estado de Hidalgo.

1.2. Objetivos específicos

Elaborar curvas de crecimiento e incremento por medio de análisis troncal para la determinación del turno para la especie de *Pinus montezumae* Lamb., en la región sureste del Estado de Hidalgo.

Elaborar curvas de crecimiento con datos de análisis troncal para la obtención de índice de sitio de *Pinus montezumae* Lamb., en la región sureste del Estado de Hidalgo.

2 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Descripción de la especie

El *Pinus montezumae* fue clasificado por primera vez en 1817 como *Pinus occidentalis* Swartz, en 1832 fue reclasificado por Lambert, con el nombre actualmente conocido. Esta especie taxonómicamente se ubica en el subgénero *diploxylon* o de los pinos duros, en la sección *montezumae* y en el grupo del mismo nombre (Rodríguez, 1997). Es un árbol de 20 a 30 m, DAP de 100 cm con tronco monopodial, con ramas persistentes, corteza gruesa, escamosa de color marrón oscuro, copa redondeada, vainas persistentes, hojas en fascículos de 4 a 5 (rara vez en 3 ó 6), en mechones densos hacia el final de las ramas, de color verde glauco a verde (Farjon y Styles, 1997).

Añadiendo para esta especie en la producción de flores es indispensable que el árbol termine el estado juvenil y que se produzcan en él concentraciones críticas de hormonas de crecimiento reproductivo, este punto en *Pinus montezumae* Lamb., se alcanza a la edad de 14 años en el rango natural de la especie, el primer paso es la diferenciación de los primordios florales, para que en la primavera siguiente se produzca la floración y polinización. Las flores masculinas se producen en la base de las hojas y se agrupan en racimos y varían de 1 a 5 por yema. Las flores femeninas brotan entre uno y dos semanas después de que el cono está minado brota y terminan de brotar antes de que la dispersión de polen concluya (Rodríguez, 1997).

Se puede encontrar en masas puras o mezcladas, cuando crece en masas mezcladas se le puede encontrar asociada a las especies siguientes: *Pinus leiophylla* Schiede ex Schlechtendal, *Pinus rudis* Endlicher, *P. pseudostrobus* Lindley, *P. teocote* Schiede ex Schlechtendal, *P. michoacana*, *P. ayacahuite*, *P. ayacahuite* var. *veitchii*, *P. hartwegii* Lindley, *Abies religiosa* y latifoliadas de 10 géneros *Quercus*, *Arbutus*, y *Alnus* entre otros (Rodríguez, 1997).

Se localiza principalmente en las montañas representativas de México, sin embargo su área de distribución se extiende hacia el norte a lo largo de la Sierra Madre Oriental y hacia el sur en Guatemala. En México se ha reportado en los estados de Nuevo León, Coahuila, Tamaulipas, Hidalgo, Tlaxcala, Puebla, Veracruz, México, Morelos, el Distrito Federal, Michoacán, Jalisco, Oaxaca, Guerrero y Chiapas (Perry, 1991), seis años después Farjon y Styles (1997) agregaron a la distribución los estados de Nayarit, Zacatecas y Querétaro.

El *Pinus montezumae* Lamb. crece bajo una variedad de condiciones que van desde cálido-templado a templado frío y altitudes de 2,000 a 3,200 m, con precipitación en su área de distribución entre 800 a 1000 mm o más al año. A mayor altitud se puede presentar nieve, aguanieve y heladas producidas durante los meses de invierno, mientras que la mayoría de la lluvia se produce durante junio-septiembre (Perry, 1991).



Figura 1. Fenología de la especie de *Pinus montezumae* Lamb., árbol joven o regeneración (izquierda) y árbol adulto (derecha). Fotos tomadas el 06 de abril del 2010 por Adrián Hernández Ramos en el Ejido Santo Tomas, Zempoala, Hidalgo.

2.2 Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb.

Mediante análisis troncales se reconstruyeron los patrones de crecimiento en diferentes dimensiones de *Pinus montezumae*, en un rango de crecimiento altitudinal de 3,000 a 3,300 (m.s.n.m.), en el poblado de San Juan Tetla, Puebla, habiéndose determinado que esta especie alcanza en promedio un crecimiento de 1.9 m a los 10 años de edad y 31.4 m a los 70 años. El incremento medio anual en altura máxima a los 40 años de edad y el incremento corriente anual culminan a los 30 años de edad promedio. Así como esta especie prospera en tres clases de calidad de estación que son rica, media y pobre calificadas a la edad base de 50 años, a los cuales se alcanza en desarrollo en alturas de 24.8, 24.1 y 22.2 m (Rodríguez, 1997).

Con respecto a las altitudes, el máximo crecimiento ocurre en las altitudes de 3,000 a 3,100 y de 3,101 a 3,200 m.s.n.m. a los 70 años de edad con 32.4 y 31.8 m de altura (Rodríguez, 1997).

2.3 Calidad de estación

La calidad de estación se remonta desde años atrás, la cual se conocía como calidad de localización forestal (Spurr y Barnes, 1980), pero este término ha evolucionado según la interpretación de varios autores, para fines prácticos la calidad de estación es la que marca la productividad relativa de un sitio, bosque u otro tipo de vegetación dentro de un microclima, resultado de la integración de los factores climáticos, edáficos, fisiográficos y biológicos, específicos para el desarrollo de una cierta especie o mezcla de especies afines que influyen en el crecimiento del arbolado de ese sitio (Spurr y Barnes; 1980, Padilla; 1987; Young, 1991; Torres y Magaña, 2001).

Sin embargo, la productividad de los terrenos forestales está influenciada, en gran parte, por la calidad del sitio o calidad de estación, que se estima mediante la máxima cosecha de madera que el bosque produce en determinado tiempo (Madrigal *et al.*, 2004). Esta se puede clasificar cualitativamente en tipos de sitio, a través de su clima, suelo y vegetación, o cuantitativamente a través de su potencial para producir madera (Torres y Magaña, 2001).

La calidad de sitio ha sido con frecuencia evaluada por medio de procedimientos indirectos como el índice de sitio (IS), que se deriva de la adaptación de las curvas de crecimiento de las variables edad-altura. Pero es difícil encontrar rodales puros coetáneos, de densidad completa y de diferentes edades, por lo que la información se obtiene mediante análisis troncales de individuo presentes en las localidades con características distintas (Madrigal *et al.*, 2004), así como de parcelas permanentes y parcelas temporales (Madrigal y Ramírez, 1996).

2.4 Índice de sitio

Es necesario aclarar que la calidad de estación e índice de sitio son conceptos que describen lo mismo, pero el primero se refiere a la categoría o rango del índice de sitio el cual se refiere a los valores de la altura dominante en metros (Benavides, 1991).

En años recientes los índices de sitio se han convertido en el método más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Torres y Magaña, 2001). Debido a esto, es la medida de producción local más común, o sea la altura promedio de los árboles dominantes y codominantes a una edad específica (Young, 1991), como es en el caso del método de desarrollo silvícola, los índices de sitio se determinan con base a la relación que existe entre la edad media-altura dominante del arbolado en cada sitio, se grafican los puntos de esta relación y se trazan curvas para definir los índices de sitio; de acuerdo al rango total de variación en altura a la edad base y a criterio del responsable de manejo, se pueden definir desde 1 a 5 índices de sitio (Aguilar, 1997).

Las curvas de índice de sitio nos sirven para clasificar los terrenos en función de su capacidad productiva para una especie forestal (Jerez *et al.*, 2011). Para ello, el método más empleado para determinar la productividad es el índice de sitio, debido a su fácil aplicación y utilidad práctica en la evaluación de la productividad de sitios (García *et al.*, 1998). Tal evaluación tiene dos supuestos importantes: *i*) la existencia de un modelo que represente fielmente la relación altura-edad; *ii*) el comportamiento de la relación altura-edad para sitios de diferente productividad sigue la trayectoria definida por la familia de curvas generadas bajo el mismo modelo (Torres y Magaña, 2001).

Para la evaluación de la calidad de sitio existen los métodos directos con procedimientos de: a) estimación del rendimiento a través de datos históricos; b)

estimación del volumen; c) estimación basada por medio de edad-altura dominante (índice de sitio) y métodos indirectos englobando: a) evaluación a partir de las características de especies del sotobosque; b) estimadores a partir de especies indicadoras; c) estimación a partir de factores abióticos característicos del rodal (Torres y Magaña, 2001).

Sin embargo, el índice de sitio es uno de los métodos más empleados para determinar la productividad de los sitios en masas coetáneas, con base en relaciones de altura dominante-edad, definiéndose como la altura dominante alcanzada por un rodal coetáneo a una edad preferente o edad base determinada (Zepeda y Rivero, 1984). La altura de un rodal uniforme, a una edad determinada, es un buen indicador del potencial productivo de ese tipo de bosque en el sitio particular, tomando en cuenta que la altura promedio del rodal es afectada por la edad y la calidad de sitio, así como por la densidad del rodal (Alder, 1980). Por tal motivo Torres y Valles (2007), mencionaron que el crecimiento en altura de cada especie puede considerarse como un producto, cuyos insumos fijos son las características del sitio disponibles para la producción de “altura” de todas las especies en el sitio, mientras que el insumo asignable para cada especie es el tiempo que tarda la especie en lograr la altura definida como producto.

La relación de esta altura con la edad “a una edad constante” (denominada edad base) es ampliamente usada en la evaluación de la calidad del sitio. En rodales coetáneos puros es llamado índice de sitio y el éxito de este se debe a que:

- a) La altura es un componente del volumen, y por lo tanto es proporcional a éste
- b) La altura y la edad son relativamente fáciles de medir
- c) El crecimiento en altura está poco afectado por la densidad del rodal
- d) El índice de sitio provee una expresión numérica para la calidad de sitio

La relación entre la altura y la edad, en bosques coetáneos puros originados de monte alto, siempre tiene la forma de una curva sigmoídea (Cruz, 2007).

2.5 Métodos de construcción de funciones de índice de sitio

Dentro de los métodos para el ajuste de índice de sitio se han usado técnicas como: curva guía que se utiliza para generar curvas de tipo anamórficas; la diferencia

algebraica, tanto éstas como las polimórficas; y la predicción de parámetros para ajustar principalmente éstas últimas, empleando como la técnica anterior, observaciones sucesivas, por lo que es necesario disponer de información de parcelas permanentes o de análisis troncales (Madrigal *et al.*, 2004).

A pesar de que el mejor método para el ajuste y cálculo del índice de sitio es la técnica de la curva guía, la cual utiliza datos de alturas dominantes de sitios temporales, existe un método de ajuste de índice de sitio que sería recomendado emplearlo en este trabajo el cual es el de diferencia algebraica, ya que éste procedimiento utiliza información proveniente de sitios de muestreo o bien de altura-edad derivados de análisis troncal (Torres y Magaña, 2001). En nuestro caso son datos de análisis troncal en el que se puede hacer una mejor estimación de la calidad de sitio en la región utilizando esta metodología.

2.6 Curvas anamórficas y polimórficas

La forma de la familia de curvas de índice de sitio se ha dividido en: anamórficas y polimórficas, las primeras se caracterizan porque la altura guarda la misma proporción a diferentes edades, haciendo que las curvas aparenten tener la misma forma; y las curvas polimórficas pueden ser de dos tipos: con intersecciones y sin intersecciones (Torres y Magaña, 2001).

2.7 Modelos de crecimiento

El crecimiento es el cambio de dimensión de un organismo en el tiempo, mientras que el incremento es la magnitud del cambio; depende de la especie, de su edad y de la calidad de sitio, así como también depende de las propiedades del suelo y de otros factores. Desde el punto de vista del tiempo se pueden distinguir tres tipos de incremento: a) Incremento corriente anual (ICA). Es el incremento volumétrico durante un cierto año; b) Incremento periódico anual (IPA). Es el incremento medio anual durante un periodo definitivo; c) Incremento medio anual (IMA). Es el incremento anual durante la edad del árbol (Grijpma, 1990; Valerio, 1997).

Los modelos de crecimiento son ecuaciones que describen el incremento experimentado por los individuos de una determinada población en función de una determinada variable independiente o explicativa (Valerio, 1997), estos tienen una amplia aplicación dentro de la silvicultura, al simular y predecir las características de los árboles y masas forestales en el tiempo y en el espacio (Aguilar, 1997).

Sin embargo, en el manejo forestal presente requiere de estimaciones objetivas del crecimiento e incremento de los árboles del bosque. Esta información es clave en la planeación de la cosecha sustentable y en la implementación de las mejores alternativas silvícolas (Corral y Návar, 2005); lo cual hace a estos modelos cruciales para la planificación del manejo forestal a cualquier nivel, dentro del cual, proyectar el incremento y rendimiento de los rodales individuales es un prerrequisito, ya que la productividad de los terrenos forestales está influida por la calidad de sitio o calidad de estación, que ha sido evaluada por medio de procedimientos indirectos como es el índice de sitio, que se deriva de la adaptación de las curvas de crecimiento de las variables edad-altura, para esto la definición de las funciones matemáticas que representan adecuadamente el crecimiento de los árboles requieren el ensayo de varios modelos y métodos de ajuste, a fin de encontrar los que mejor ilustren el conjunto de datos (Madrigal *et al.*, 2004).

Los modelos de crecimiento presentan una modelación grafica llamada curva de crecimiento que se puede definir como una gráfica de tamaños acumulados, esta representa la suma de todos los incrementos anuales acumulados sobre el periodo de observación, así que el crecimiento puede considerarse como la suma de los incrementos anuales. Por lo general una curva de crecimiento típica toma una forma sigmoideal (Rojo *et al.*, 2005). Como se observa la utilización de modelos, para determinar la calidad de estación, es muy variada y con mayor frecuencia en las especies de coníferas, pero de estos modelos utilizados en diferentes trabajos los que mejores resultados se han obtenido, son las fórmulas matemáticas de Chapman-Richards y Schumacher como se pueden observar en el Cuadro 1.

Para poder compararlos y afirmar su eficiencia Torres y Magaña (2001), recomiendan utilizar un tercer modelo de crecimiento, el cual es el de Weibull y puede llegar a obtener resultados confiables. Sin embargo debido al gran resultado que han

dado estos modelos para índice de sitio solamente se utilizara el modelo de Schumacher por presentar mejores resultados en más trabajos.

Cuadro 1. Modelos con mejores resultados en la predicción de calidad de estación e índice de sitio para especies de coníferas.

Nombre	Autor y año	Tema	Especie
Chapman-Richards	Rodríguez y Arteaga (2005)	Determinaron el índice de sitio con familia de curvas polimórficas.	<i>Pinus chiapensis</i> (Martínez) Andersen.
	Madrigal <i>et al.</i> (2004)	Índice de sitio con curvas polimórficas.	<i>Pinus pseudostrobus</i> .
	Torres (2001)	Índice de sitio para curvas polimórficas.	Varias especies de <i>Pinus</i> .
	Aguirre y Zepeda (1985)	Índice de sitio con curvas polimórficas.	<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.
Schumacher	Mares <i>et al.</i> (2003)	Índice de sitio con curvas anamórficas.	<i>Pinus herrerae</i> Martínez.
	Monroy (1996)	Determinación de curvas de índice de sitio.	<i>Pinus patula</i> Schl. <i>et</i> Cham.
	Benavides y Manzanilla (1993)	Determinación de índice de sitio con curvas polimórficas.	<i>Pinus michoacana cornuta</i> Martínez y <i>Pinus oocarpa</i> Schiede.
	Torres (2001)	Índice de sitio con curvas polimórficas.	Varias especies de <i>Pinus</i> .
	Benavides (1991)	Índice de sitio con curvas anamórficas.	<i>Pinus michoacana</i> , <i>Pinus oocarpa</i> , <i>Pinus leiophylla</i> y <i>Pinus lumholtzii</i> .
	Madrigal <i>et al.</i> (2004)	Índice de sitio con curvas polimórficas.	<i>Pinus pseudostrobus</i> .
	Aguilar (1997)	Calidad de sitio con curvas polimórficas.	<i>Pinus douglasiana</i> Martínez y <i>Pinus lawsonii</i> Roehl.

2.8 Turno

Al período de tiempo que transcurre desde la formación de un bosque o rodal por siembra, plantación o cualquier otro medio, hasta su aprovechamiento final se le conoce como turno. Desde el punto de vista económico, el turno es un periodo de inversión, por eso deben considerarse los aspectos de rentabilidad y para poder decir cuál es un turno adecuado, se toman en cuenta factores de carácter biológico, estacional y socioeconómico que afectan la longitud del mismo (SARH-SF, 1985).

Sin embargo, la determinación del momento óptimo para talar un árbol o especie forestal es un problema clásico en el contexto forestal, y a ese momento se le conoce con el nombre de turno óptimo. Esta cuestión ha sido tratada desde una perspectiva técnica, la cual sólo tiene en cuenta la función de crecimiento del árbol, y desde una perspectiva económica, la cual incorpora aspectos monetarios (Amparo y Almeida, S.F.), sin embargo, Martínez *et al.*, (2004) mencionan que el turno forestal varía considerablemente de acuerdo a la calidad de estación y al manejo que se le aplique al rodal siendo ilógico aplicar un valor fijo de turno forestal a la totalidad de los bosques bajo manejo. Para el cálculo del turno se consideran tres fases:

- Etapa de establecimiento, que es la etapa en que la regeneración se instala y reúne el vigor (biomasa de follaje mínima) suficiente para comenzar un desarrollo de crecimiento exponencial;
- Etapa de crecimiento inicial, que es el período en que los nuevos árboles forman masas cerradas hasta lograr una altura de 1.3 m.
- Etapa de crecimiento en diámetro, donde los individuos crecen hasta alcanzar el diámetro final deseado.

2.9 Tipos de turno

Pero para esto hay diferentes tipos de turno, que van dependiendo del producto o el objetivo del aprovechamiento forestal; SARH-SF (1985), menciona que en función del factor más importante para determinar la duración del turno, en forma clásica se conocen cinco tipos, los cuales se definen a continuación:

Turno físico: es el que coincide con la duración natural de la vida de una especie en un sitio determinado.

Turno silvícola: es aquel que asegura que la especie mantenga un vigor satisfactorio de crecimiento y de reproducción.

Turno técnico: se define como la edad a la cual el árbol alcanza un diámetro de explotabilidad propio para satisfacer la demanda de la industria establecida. Para obtener el turno técnico se puede obtener de acuerdo a los valores tabulares del crecimiento e incremento en diámetro o a través de la ecuación del crecimiento

en diámetro de cada especie y calidad de estación (Velarde, 2002). También, SARH-SF (1985), lo define como aquel en el que una especie dada rinde la mayor cantidad de materia prima de un tamaño u otra especificación para un uso especial.

Turno absoluto: Se define como la edad a la que se obtiene la máxima producción leñosa sin importar la naturaleza o calidad de los productos y se determina en base a la culminación del ICA en volumen (Velarde, 2002). También, SARH-SF (1985), lo define como aquel que produce la mayor cantidad de material leñoso, sin interesar la naturaleza o calidad de los productos.

Turno financiero: es aquel que produce el más alto interés económico.

En base a los conceptos de turno descritos, actualmente en el MDS se ha considerado por un lado captar al máximo el crecimiento del arbolado (incremento medio anual máximo), el tipo de productos a obtener (alcanzar un diámetro determinado) y la edad para producir semilla (para poder aplicar árboles padres); se puede decir que se utiliza una combinación de turnos, específicamente el absoluto, técnico y silvícola (SARH-SF, 1985).

2.10 Determinación del turno

Por medio del cálculo del ICA e IMA y la edad se obtiene un turno absoluto que se localiza en la intercepción de las líneas de ajuste de las curvas de ICA e IMA, también partiendo de este indicador es posible establecer un diámetro deseable de extracción para la industria forestal al que se le llama turno técnico, interceptando el diámetro con la línea de ajuste de la edad. Este cálculo ayuda a determinar una edad aproximada de corte y un ciclo de corta estándar que ayuda en la planeación de las actividades y en la organización de los frentes de corta para el aprovechamiento de un bosque (Sánchez, 2011). Aunque también corresponde al valor máximo de la curva de IMA en altura, o sobre la curva guía en el punto en que una recta que parte del eje coordenado es tangente a la curva guía (Zepeda y Rivero, 1984).

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del área de estudio

3.1.1 Ubicación

El área de estudio está ubicada dentro de la UMAFOR 1303 (Pachuca-Tulancingo) en el Estado de Hidalgo, en los ejidos Singuilucan, Sabanetas en el municipio de Singuilucan y Santo Tomás en el municipio de Zempoala y Tepeapulco. Se encuentra con una localización geográfica entre los 19°43' y 20°09' paralelos de longitud norte y los meridianos 98°10' y 98°48' de longitud oeste, con una altitud sobre el nivel del mar variable (Cuadro 2).

Cuadro 2. Localización geográfica de los diferentes ejidos donde se colectaron las muestras para el análisis troncal.

Ejido	Municipio	Coordenadas		Altitud (msnm)
		Latitud N	Longitud W	
Ejido	Singuilucan	19°57'30''	98°25'20''	2809
Singuilucan		19°57'07''	98°25'08''	2800
Ejido	Singuilucan	19°59'22''	98°26'02''	2792
Sabanetas				
Ejido Santo	Tepeapulco y	19°52'46''	98°29'05''	3111
Tomás	Zempoala	19°53'10''	98°28'39''	3028
		19°53'30''	98°29'35''	3010

3.1.2 Clima

Según la clasificación climática de Köppen modificada por García-CONABIO (1998), los climas característicos de esta región son los que se presentan en el Cuadro 3.

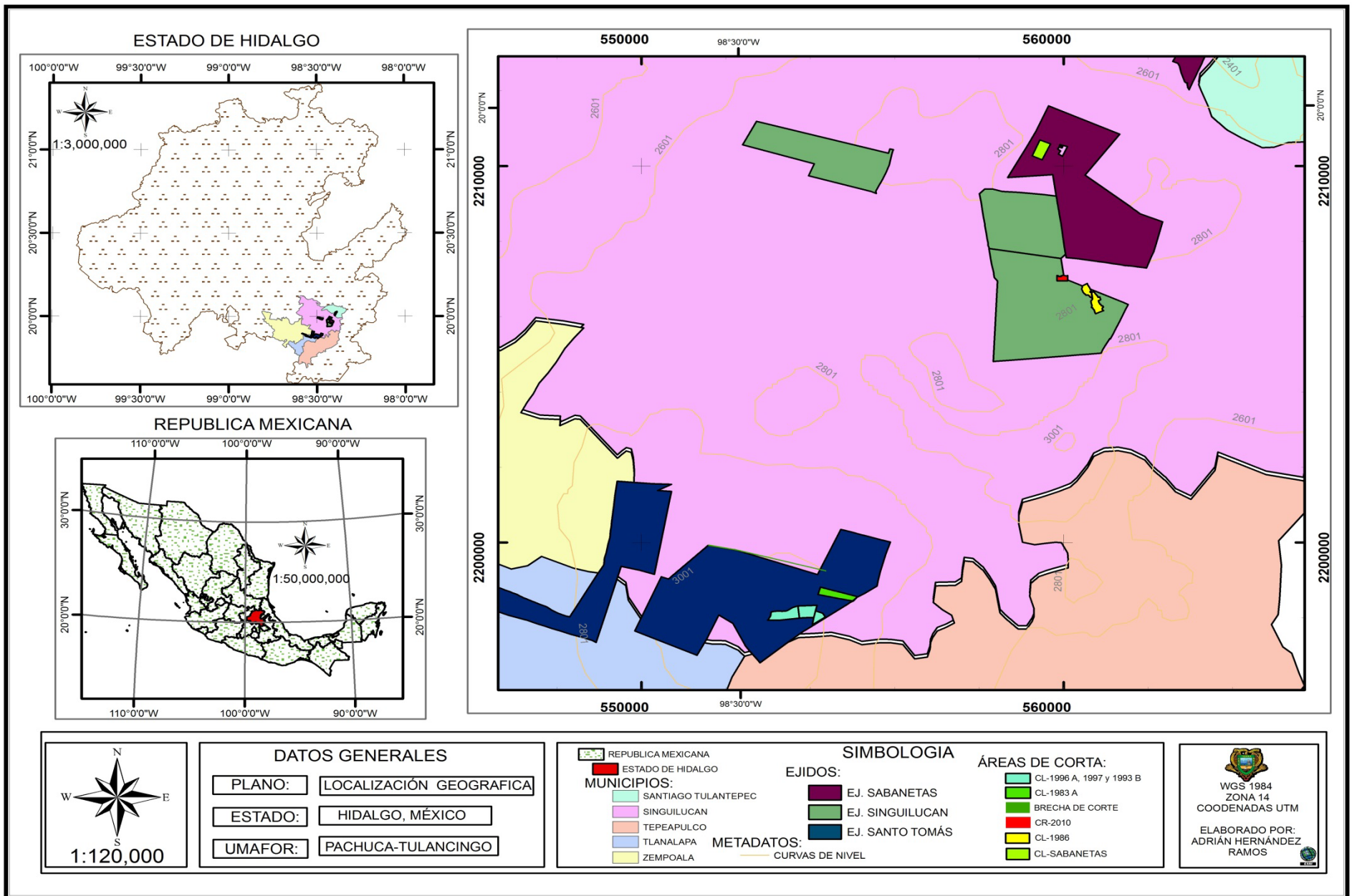


Figura 2. Mapa de localización geográfica del área de estudio y de cada ejido evaluado.

Cuadro 3. Descripción de climas por municipio del área de estudio.

Clave	Municipios	Ejidos	Descripción
C(w1)	Singuilucan, Tepeapulco, y Zempoala	Ejido Sabanetas, Ejido Singuilucan y Ejido Santo Tomas	Templado subhúmedo, con temperatura media anual entre 12°C y 18°C, presentando entre -3°C y 18°C el mes más frío y el mes más caliente 22°C. Precipitación en el mes más seco de 40 mm; lluvias de verano con índice de P/T entre 43.2 y 55 % y 5 al 10.2 % de lluvia invernal del total anual.

3.1.3 Suelo

De acuerdo con la clasificación de FAO-UNESCO, el tipo de suelo existente en el área de estudio son Feozem haplico (Hh), Regosol districo (Rd), Cambisol humico (Bh) y litosol (I), característicos de suelo con textura media (INIFAP-CONABIO, 1995), el primero de los suelos es rico en materia orgánica y con superficie oscura, caso contrario con los tres restantes que presentan poco desarrollo, con una superficie clara y muy delgados (INEGI, 2011).

3.1.4 Vegetación

Según la clasificación del INEGI y su cartografía, la vegetación existente es Bosque de pino-encino (INEGI, 2009). La composición de este tipo de vegetación está dividida por tres estratos; el estrato superior está formado por *Pinus montezumae*, *Pinus teocote*, *Pinus rudis* y *Pinus pseudostrobus* alcanzando en promedio los 25 m de altura y 45 cm de diámetro; el estrato medio formado por *Quercus mexicana*, *Quercus rugosa*, *Alnus arguta* y *Arbutus halepensis*; y el estrato inferior corresponde a un sotobosque constituido principalmente por herbáceas y arbustivas en las que se

encuentran *Barachis conforta*, *Solidago velutina*, *Fragaria indica*, *Muhlenbergia macrorura* y *Senecio grandifolius* (Salinas et al. 2001).

3.1.5 Hidrología

Los municipios que abarca el estudio y la distribución natural de la especie *Pinus montezumae*, en el sureste del estado de Hidalgo, pertenece a la RH-Río Panuco la cual abarca la mayor parte del territorio del Estado; dentro de las cuencas Lago Texcoco (C80T) y cuenca de Río Panuco (C81P), abarcando la subcuencas Pachuca-Cd. de México, San Lorenzo y en menor proporción Tortugas-Tepezata (CONAGUA-Subdirección, 2007).

3.2 Análisis troncal

3.2.1 Marqueo del arbolado

Los rodales donde se obtuvieron las muestras de análisis troncal son áreas de los ejidos ya mencionados que se encuentran bajo manejo forestal autorizados por la SEMARNAT, los árboles utilizados fueron marcados con el martillo de la COAFA S.P.R. de R.I. para los ejidos de Singuilucan y Santo Tomás, mientras que para el ejido Sabanetas se utilizó el martillo de la responsiva técnica de la Asociación de Silvicultores de la Región Forestal Pachuca-Tulancingo A. C., con su respectivo oficio de autorización.

Los árboles seleccionados en las diferentes áreas de corta fueron los de mayor altura y diámetro con buenas características para determinar los parámetros de Calidad de sitio, y para turno se obtuvieron árboles que van desde intermedios, codominantes y dominantes, como se puede observar el Cuadro 4, dónde se muestran el tipo de árboles que se pudieron extraer de acuerdo con el objetivo de cada una de las cortas.

En estas áreas de los diferentes ejidos se realizaron varios recorridos con objetivo de elección, marcajeo y derribo del arbolado que cumplió con las características necesarias para su evaluación y obtener las muestras de análisis troncal.

Cuadro 4. Áreas de extracción de muestras para análisis troncal, por ejido.

Municipio	Ejido	Tratamiento	Área	Árboles
Singuilucan	Singuilucan	Corta de Liberación	1986	Dominantes
		Corta de Regeneración	2010	Intermedios y codominantes
	Sabanetas	Corta de Liberación	Sabanetas	Dominantes
Zempoala	Santo Tomas	Corta de Liberación	1996 A, 1997 y 1993 B	Dominantes y codominantes
		Corta de Liberación	1983 A	Dominantes y codominantes
		Brecha Corta Fuegos	Brecha	Intermedios y codominantes

3.2.2 Muestreo y elección del arbolado

El método de muestreo que se utilizó para la elección del arbolado fue selectivo tomando en cuenta en esta selección los siguientes criterios necesarios para obtener turno y calidad de sitio: árboles dominantes, codominantes e intermedios y fustes no bifurcados.

Sin embargo, los individuos de mayor tamaño en diámetro y más representativos presentaron ocoteado (técnica para la extracción de combustible para leña) y la presencia de incendios poco intensos, ya que esta zona tiene una gran incidencia de incendios naturales y causados por las actividades agrícolas y ganaderas.

El número de árboles totales elegidos en los tres ejidos fueron 41, distribuidos en las diferentes áreas de corta, eliminando un árbol porque presentó una compresión en su crecimiento concéntrico, haciendo difícil identificar los anillos anuales y para el trabajo solo se utilizaron 40. La cantidad de árboles por ejido dependió del tamaño del área de corta y de la presencia de árboles con las características necesarias para su evaluación (Cuadro 5).

Cuadro 5. Localidades evaluadas y número de muestra por ejidos.

Municipio	Ejido	Área	No. de muestras
Singuilucan	Singuilucan	1986	10
		2010	8
Zempoala	Sabanetas	Sabanetas	3
	Santo Tomas	1996 A, 1997 y	12
		1993 B	
		1983 A	6
	Brecha	2	

3.2.3 Colecta de rodajas

Para el apeo del arbolado se utilizó un brigada equipada con dos motosierras, una para realizar el derribo direccional y la segunda para realizar el desrame del árbol. El troceo se inició a partir del tocón a una altura promedio de 30 cm, en seguida se realizaron los cortes de las rodajas a longitudes comerciales de 8 ft de largo (2.54 m) variando según la deformidad de los árboles y en las puntas a longitudes mas cortas que van de 1.25 m hacia abajo dependiendo del grosor que presentaba la troza o fuste. A cada troza y longitud de corte se le agregó de 4 a 6 cm de refuerzo que se eliminó al secar y aserrar la madera, así como también a la longitud se le agregó el grosor de la rodaja que fue en promedio 5 cm.

Al obtener las rodajas se marcó la parte de abajo con una cruz para identificar la altura exacta a la que fue cortada y evaluada, también anotando en la parte de arriba los datos del árbol como No. de árbol y No. de rodaja. Para la identificación de la especie se tomó una muestra botánica con presencia de conos para poder asegurarnos que la especie fuera la correcta.

3.2.4 Determinación de la edad del renuevo

Debido a que el primer corte se realizó en la rodaja a 30 cm de altura no se tiene el conteo de anillos completos para determinar la edad del árbol ya que en esta altura se pierden, para identificar este número de anillos ausentes se utilizó regeneración

natural cercana realizando cortes en la base y a 30 cm de altura, obteniendo una diferencia entre estos valores que corresponde a los años que se perdieron y que se sumaran al total de años que presenta la primera rodaja y así obtener la edad total del árbol. Los valores de edad a 30 cm fueron de 5 años para los ejidos de Singuilucan y Sabanetas y para el ejido Santo Tomás presentó un valor de 3 años. La diferencia de años se debe a la diferencia de productividad de las áreas que influyen en el desarrollo de la especie.

3.2.5 Preparación de las muestras

Las muestras fueron secadas al aire libre durante un promedio de 3 meses, una vez secas se lijaron con una maquina lijadora industrial de banda marca TRUPER, con la finalidad de hacer la superficie más lisa y tener mejor visión de los anillos de crecimiento y facilitar la detección de los anillos falsos y verdaderos. Después del lijado las muestras se humectaron con combustible diesel para resaltar la madera temprana y la madera tardía; para evitar que la corteza se desprendiera por completo por los cambios bruscos de humedad ésta se clavó a la madera de las rodajas.

3.2.6 Evaluación y toma de datos

La evaluación de las rodajas se realizó en base a su diámetro promedio, para evitar que se sub o sobreestimaran las medidas, sobre este diámetro se trazó una línea horizontal donde se contaron los anillos verdaderos y falsos incompletos o punteados, siguiendo el procedimiento de análisis de crecimiento propuesto por Monroy (1996), esto se realizó para cada árbol y con sus respectivo número de rodajas:

- Se contaron los anillos de crecimiento en la rodaja a 0.30 m de altura del fuste, evitando incluir los falsos anillos.
- Al número de anillos encontrados, se sumaron para los Ejidos Singuilucan y Sabanetas 5 años y para Santo Tomás 3 años (tiempo estimado para que el árbol haya alcanzado la altura de 0.30 m) para obtener la edad total del árbol.

- Se contó el número de anillos completos en cada uno de las rodajas tomadas a longitudes comerciales a partir de 0.30 m, anotando las medidas en los formatos correspondientes.
- Se procedió a calcular las edades de cada corte realizado en el árbol a diferentes alturas. Esto se realizó por diferencia entre la edad actual del árbol y el número de anillos encontrados en cada sección.
- Después de tener la edad se prosiguió a marcar los anillos por categorías de edad de cinco años y a estas edades se tomó el diámetro promedio de cada categoría.

3.2.7 Procesamiento de datos de análisis troncal

Los datos de análisis troncal de los 40 árboles se agruparon en pares de datos tomando todas las variables en relación con la edad, quedando edad-diámetro normal, edad-altura, edad-área basal y edad-volumen.

El diámetro normal se obtuvo por medio de una ponderación entre la rodaja inferior y superior a 1.3 m. La variable altura se obtuvo con medición directa, correspondiente a cada altura donde se realizó el corte de rodajas en el árbol y se realizó cada vez que se extraía una rodaja. El área basal corresponde al área del diámetro normal a 1.30 m que fue calculado con ponderación, realizando esto para cada categoría de edad del árbol. Se utilizó la siguiente fórmula:

$$AB = \left(\frac{\pi}{4}\right) * DN^2$$

dónde:

AB = Área basal a 1.30 m.

DN = Diámetro normal en metros a 1.30 m,

El volumen se calculó para cada una de las trozas por categoría de edad, se dividió en dos partes, el cálculo del volumen de la troza y el cálculo del volumen del cono o de las puntas del árbol en esta parte se calculó la altura de la punta, para obtener el volumen exacto a la edad determinada. Esta variable dasométrica se calculó con las siguientes fórmulas:

fórmula de Smalian o para el cálculo del volumen del Paraboloides:

$$V = \left(\frac{A_B + A_S}{2} \right) * L$$

dónde:

V: es el volumen del paraboloides o troza

A_B: es el área de la sección basal inferior de la troza

A_S: es el área de la sección superior de la troza

L: es la longitud de la troza,

fórmula del cono para el cálculo del volumen de las puntas de los árboles:

$$V = \frac{S_0 H}{3}$$

dónde:

V: volumen total de la punta del árbol

S₀: área de la base de la punta del árbol o parte inferior de la troza.

H: altura del cono, altura de la categoría de edad alcanzada

Para la fórmula anterior es necesario calcular la altura del cono o altura de la punta ya que a una edad determinada no se tiene con exactitud, esta se puede obtener por interpolaciones mediante gráfico que sobrestima la altura del árbol o mediante fórmulas basadas en el conteo de anillos y en las alturas de obtención de las rodajas siendo este último método el más recomendado ya que utiliza las mediciones reales.

La interpolación mediante fórmulas asume que las rodajas se obtuvieron en la mitad del incremento anual o periódico en altura. Distribuye heterogéneamente los ápices perdidos entre las alturas de obtención de las rodajas, pero produce una distribución homogénea en secciones sucesivas (Cancino, 2002).

Fórmula de Carmean para el cálculo de la altura de los ápices perdidos entre rodajas a una determinada edad:

$$H_{ij} = h_i + \frac{h_{i+1} - h_i}{(r_i - r_{i+1} - 0.5)} + (j-1) \left(\frac{h_{i+1} - h_i}{r_i - r_{i+1} - 0.5} \right)$$

dónde:

H_{ij} : Altura total estimada para el anillo de crecimiento j basado en la sección i .

h_i : Altura del punto i -ésimo

$h_{i+1} - h_i$: Altura total de la sección tope

r_i : Número de anillos de crecimiento (asumiendo la medula el punto de inicio)

r_{i+1} : Número de anillos de crecimiento en la parte terminal

0.5: Constante de fórmula.

Retomando las fórmulas de Smalian y la del cono se sumaron los resultados de cada una para obtener el volumen total del árbol a una edad determinada y la fórmula final es la siguiente:

$$VT = \left(\left(\frac{A_B + A_S}{2} \right) * L \right) + \left(\frac{S_0 H}{3} \right)$$

3.3 Determinación de turno

3.3.1 Modelos de crecimiento

El análisis de las variables diámetro, altura, área basal y volumen se realizó utilizando cuatro diferentes modelos de crecimiento, determinados los tres primeros por presentar un buen ajuste para estas variables en trabajos relacionados y el cuarto modelo se utilizó para comprobar la eficiencia de los primeros modelos (Cuadro 6). Las variables dasométricas (diámetro (cm), altura (m), área basal (m²) y volumen (m³)) en relación con la edad fueron analizadas en el programa estadístico SAS versión 9.0 con la metodología PROC-NLIN siendo esta una regresión no lineal de las diferentes formas de los cuatro modelos. Obteniendo del programa los estadísticos y coeficientes de regresión para la selección del mejor modelo ajustado a cada variable tomando en

cuenta los estadísticos: R^2 , R^2_{adj} , CME y F-Calculada, el mejor modelo debe de presentar valores altos de R^2 , R^2_{adj} y un valor bajo de CME.

Para el cálculo de algunos estadísticos que no determina el programa se utilizaron las fórmulas siguientes:

$$\text{Cálculo de } R^2: 1 - \frac{SS(\text{residual})}{SS(\text{corrected total})}$$

$$\text{Cálculo de } R^2_{adj}: 1 - \frac{MS(\text{residual})}{MS(\text{corrected total})}$$

Cuadro 6. Modelos de crecimiento utilizados para la estimación de diámetro, altura, área basal y volumen.

Nombre del modelo	Ecuación
1. Schumacher	$Y = \exp^{(B_0 + B_1/E)}$
2. Chapman – Richards	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 * E)}]^{B_2}$
3. Weibull	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 (E^{B_2}))}]$
4. Korf	$Y = \exp^{(B_0 - (B_1/E^{B_2}))}$

Y=altura; E=edad; β =parámetros. Fuente: Corral y Naval (2005); Sit y Poulin-Costello (1994).

3.3.2 Cálculo del incremento corriente anual

Para cada variable se eligió el mejor modelo ajustado a los pares de datos y con este se obtuvieron los valores predichos en Excel 2010, donde se sustituyeron los valores de los coeficientes de regresión en la fórmula de cada modelo elegido, también se calculó el ICA para cada variable con los valores ajustados, utilizando la fórmula común que se muestra a continuación:

$$ICA = \frac{y_2 - y_1}{E_2 - E_1}$$

dónde:

y_1 = Valor dasométrico anterior o primera medición

y_2 = Valor dasométrico superior o segunda medición

E_1 = Edad anterior o de la primera medición

E_2 = Edad superior o de la segunda medición

3.3.3 Cálculo del incremento medio anual

Para el cálculo del IMA, al igual que para el cálculo del ICA, se utilizaron los valores predichos calculados con el modelo que mejor ajuste presentó para diámetro, altura, área basal y volumen. La fórmula que se utilizó fue la misma para todas las variables analizadas y es la siguiente:

$$\text{IMA} = \frac{Y \text{ (estimados)}}{\text{Edad}}$$

3.3.4 Determinación del turno absoluto de la especie.

El turno absoluto es aquel en que una especie produce la mayor cantidad de material leñoso, sin interesar la naturaleza, la calidad de los productos u otra especificación para un uso potencial (SARH-SF, 1985). Esta edad se obtuvo con tres técnicas diferentes las cuales son:

- a) Graficando los valores del ICA e IMA calculados (predichos) de cada variable (diámetro, altura, área basal y volumen), donde presentan una intersección de estas dos líneas, el valor de la edad en ese punto corresponde al turno absoluto de la especie.
- b) En la lista de los datos del IMA (predichos) el valor más alto en este incremento acumulado se presenta la edad del turno absoluto.
- c) En el gráfico de los valores estimados o curva promedio de los datos, al trazar una línea recta partiendo del 0,0 como origen con tendencia a tocar

la curva (tangente de la curva) y en el punto que la toca es el valor de la edad base o turno absoluto.

La construcción de las gráficas donde se presentan las curvas de los predichos, ICA e IMA correspondientes a cada variable se realizó en el programa SigmaPlot versión 10.0, las gráficas resultantes son las que se utilizaron para representar los resultados de turno absoluto.

3.3.5 Determinación del turno técnico

El Turno técnico es aquel en el que una especie dada rinde la mayor cantidad de materia prima de un tamaño u otra especificación para un uso especial (SARH-FS, 1985). La especificación que se puede dar para determinar este turno depende del uso al cual será destinada esta materia prima, caso más común es el diámetro en el que se determina una cierta medida comercial y en base al diámetro se puede determinar la edad a la que se cumple este requisito, determinando estos años como el turno técnico de la especie.

3.3.6 Distribución de productos en relación al turno técnico

La distribución de productos se realizó en base a un porcentaje para *Pinus montezumae* Lamb., utilizado en los programas de manejo de la región y de los ejidos en estudio (Cuadro 7).

Cuadro 7. Porcentaje de distribución de productos en el aprovechamiento maderable, para *Pinus montezumae* Lamb.

Tipo de producto	Distribución de productos (%)
Largas dimensiones	60
Cortas dimensiones	25
Material celulósico	3
Leña para combustible	7
Desperdicios	5
Total	100

Fuente: Programa de Manejo Forestal elaborado por COAFA S. P. R. de R. I., (2010).

3.4 Determinación de la calidad de sitio para la especie de *Pinus montezumae* Lamb.

3.4.1 Selección del arbolado suprimido

Los árboles utilizados para el cálculo de la calidad de sitio deben presentar crecimiento uniforme y libre de competencia en la mayor parte de su vida, así para poder estimar con precisión el índice de sitio de mayor producción para la región determinada. La elección de los árboles suprimidos del conjunto de datos de análisis troncales se realizó tomando solamente dos métodos:

- a) Se eliminaron los árboles que fueron marcados en el campo como suprimidos o intermedios, por las características que presentaban de estar debajo de un dosel dominante o con crecimiento lento en relación a árboles vecinos.
- b) Con la comparación gráfica de los perfiles de cada individuo evaluado, se eliminaron los que presentaron un crecimiento no uniforme y comprimido en los primeros años de su vida marcada esta edad como el turno absoluto de la especie, tomando en cuenta la compresión del crecimiento por la temporada de sequías en la región.

La comparación de perfiles no fue muy confiable ya que en la región se presentan temporadas largas de sequía y que pueden influir en esta elección, también no se tomó otro método para evaluar los árboles suprimidos porque en campo se encontraron los mejores crecimientos en estos individuos y son los que pueden acercarse a la mayor producción del rodal, dando como resultado la eliminación de cuatro árboles quedando así solamente 36 para la estimación del índice de sitio.

3.4.2 Modelo de crecimiento e incremento utilizado para la determinación de las curvas anamórficas y polimórficas de índice de sitio

El modelo de Schumacher fue elegido por su flexibilidad en la construcción de curvas anamórficas y polimórficas, mostrándolo algunos autores como el que presenta un mejor ajuste para la familia de datos de edad-altura en una regresión no lineal,

también se considera como adecuado al combinar correctamente una representación biológica en un bajo número de parámetros (Andenmatten y Letourneau, 2000; Hernández, 2003; Ortega y Montero, 1988; Ruiz, 2011; Andenmatten y Letourneau, 1997; Coronado, 1997; Iturre y Araujo, 2006; Benavides y Manzanilla, 1993), la fórmula general del modelo es la que se presenta a continuación:

$$Y=B_0*\text{Exp}^{(-B_1/E)}$$

dónde:

Y= Altura dominante

E= Edad del árbol

Exp= Base de los logaritmos naturales

B₀ y B₁= Parámetros

El ajuste del modelo para las variables edad-altura dominante se realizó mediante técnicas de regresión no lineal con el empleo del paquete estadístico SAS versión 9.0 con el procedimiento PROC NLIN, donde se obtuvieron los valores estadísticos CME y R²_{adj} para asegurar un ajuste adecuado del modelo para este conjunto de datos y evitar sesgos en la creación de las curvas de índice de sitio.

3.4.3 Determinación de la edad base

Para la determinación del índice de sitio es necesario de la determinación de la edad base o el número de años que se eligen para obtener este valor, también se le conoce como edad de referencia o edad índice (Zepeda y Rivero, 1984). También sirve para definir la familia de curvas, o sea crear curvas hacia arriba y hacia debajo de la promedio y se determina antes de iniciar la construcción de las curvas (Benavides y Manzanilla, 1993).

Una vez ajustado el modelo de Schumacher y obtenidos los valores de sus parámetros, se realizó la estimación de la altura a diferentes edades para crear la curva de crecimiento en altura, con esto se determinó la edad base utilizando el método de forma gráfica, donde el punto correspondiente a la edad base puede localizarse sobre

la curva de IMA en altura, a la edad en la que esta alcanza su valor máximo, o sobre la curva guía en el punto en que una recta o tangente que parte del origen del eje coordenado es tangente a la curva guía este método fue planteado por Zepeda y Rivero (1984).

3.4.4 Construcción de la familia de curvas con el método anamórfico

Para la determinación del índice de sitio con el método anamórfico se utilizó el método de la curva guía, siendo ésta la técnica más fácil y práctica para la obtención de familia de curvas, utilizando datos de análisis troncales, donde nos permite realizar curvas de crecimiento de pendiente común o curvas con la misma tendencia, asumiendo que en todas las índice de sitio tienen la misma forma de crecimiento.

Después de ajustar el modelo y obtener los valores de los parámetros se estimaron los valores para las respectivas edades, obteniendo así la curva guía, donde utilizando la edad base establecida con el cruce el ICA e IMA se determinó la altura dominante para esa curva promedio y en base a la amplitud del diagrama de dispersión se estableció una equidistancia de dos metros entre curvas, esto para construir la familia de curvas. Para crear la familia de curvas se sustituyeron los valores de edad base y el valor de la altura dominante para esa edad en la ecuación de Schumacher de su forma anamórfica, presentada por Andenmatten y Letourneau (2000). La función es la siguiente:

$$H = \left(\frac{IS}{e^{(B_1/EB)}} \right) e^{(B_1/E)}$$

dónde:

H= Altura total o dominante a un índice de sitio determinado

IS= Valor del índice de sitio determinado con la curva promedio

EB= Edad base (turno absoluto)

E= Edad del árbol

e= Base de los logaritmos naturales

B₁= Parámetro (pendiente de la curva)

La función representa un patrón de crecimiento donde la altura dominante máxima es específica al sitio y una tasa constante de crecimiento (Gómez-Tejero *et al.* 2009). En la cual a partir de B_0 se deriva la ecuación anamórfica donde este parámetro se supondrá variable, manteniendo constante B_1 igual para toda la familia de curvas (lo que garantiza la misma forma), el cual representa la pendiente que presentan las curvas (Torres, 2001).

Con esta fórmula derivada de la ecuación exponencial de Schumacher (Cuadro 6), se crean la familia de curvas sustituyendo el valor de B_1 , edad base, altura de índice de sitio propuesto a dos metros hacia arriba y debajo de la curva promedio y la edad del árbol gradualmente desde el estado juvenil hasta el estado adulto.

3.4.5 Construcción de la familia de curvas con el método polimórfico

Para determinar la familia de curvas del método polimórfico se utilizó la diferencia algebraica, donde a partir de la fórmula original de Schumacher se derivó una nueva ecuación, la cual tomó los valores de los parámetros ajustados con la ecuación original, se tomó la misma edad base que para las curvas anamórficas, se ajustó la curva promedio de altura y estos valores se sustituyeron, tomando equidistancia entre curvas de tres metros en la altura dominante para cada índice de sitio establecido, derivado del diagrama de dispersión de los datos y el acomodo de las curvas dentro de este diagrama, en la siguiente ecuación tomada de Gómez-Tejero *et al.* (2009):

$$H=B_0 \left(\frac{IS}{B_0} \right)^{\left(\frac{EB}{E} \right)}$$

dónde:

H= Altura total o dominante a un índice de sitio determinado

IS= Valor del índice de sitio determinado con la curva promedio

EB= Edad base (turno absoluto)

E= Edad del árbol

B_0 = Parámetro

Esta ecuación se derivó a partir de B_1 donde se hace variar la pendiente de la curva o tasas de crecimiento entre sitios forestales pero con potencialidad máxima constante, lo que ocasiona que la familia de curvas no tengan la misma forma o el mismo crecimiento en cada índice de sitio (Gómez-Tejero *et al.* 2009)..

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Determinación de turno

4.1.1 Crecimiento e incremento en diámetro

Debido al conjunto de datos obtenidos por análisis troncal de 40 árboles de *Pinus montezumae* Lamb., el modelo de crecimiento que mejor se ajustó fue el de Korf al presentar los mejores valores estadísticos como es una $R^2_{Adj} = 0.9509$ y un CME = 69.47, seguido por el modelo de Schumacher con una $R^2_{Adj} = 0.9508$ y un CME = 69.4513, presentaron muy poca diferencia en los resultados de cada modelo.

Los otros dos modelos de Chapman-Richards y Weibull presentaron un ajuste adecuado y parecido a los modelos de Korf y Schumacher, pero con valores menores de R^2_{Adj} o mayores en caso del CME, esto se puede corroborar en el Apéndice 1.

En relación a la predicción del diámetro en otros trabajos no concuerdan con este modelo obtenido, como es el caso de Corral y Navar (2005) que en su trabajo análisis de crecimiento e incremento obtuvieron que el modelo de Korf, junto con otros dos más, no presentan un ajuste adecuado para diámetro y los que mejor se ajustan son los de Chapman-Richards y Weibull, también para Sandoval (2010) en el ajuste de diámetro en especies tropicales el modelo de Weibull mostró el mejor valor en R^2 , que en nuestro caso fue el que mostró los menores valores. Para Monárrez (2003) en la predicción del rendimiento en masas específicas de *Pinus durangensis* Mtz., en el Estado de Durango, encontró que el mejor modelo para realizar el ajuste en diámetro es el de Schumacher.

Debido a lo mencionado anteriormente, se considera que al obtener el modelo de Korf, cambia la rutina de utilizar los modelos comunes y con mayores resultado en otros trabajos (Schumacher, Chapman-Richards y Weibull), comprobando que hay variedad de modelos que pueden obtener buenos resultados para diámetro.

Con el modelo elegido se creó la curva de crecimiento, la cual presenta un crecimiento sigmoideal y comparando esta curva con el diagrama de dispersión como se

puede observar en la Figura 3, se observa un ajuste adecuado con los datos al localizarse en la media de la dispersión de dichos datos. Al inicio de la curva presenta un crecimiento rápido hasta llegar a un punto de inflexión que se presenta a la edad de 41 años donde a partir de ese punto empieza a disminuir su crecimiento y crear una tendencia a la estabilidad o a la forma lineal de la curva.

El punto de inflexión de la curva de crecimiento predicha concuerda con el punto en el que el ICA e IMA se interceptan (Figura 3), correspondiente a los 41 años con un diámetro de 26.81 cm que en este caso corresponde al turno absoluto de *Pinus montezumae* Lamb., en esta región del Estado de Hidalgo. También se puede observar el punto máximo de ICA de 0.9328 cm año⁻¹ a la edad de 21 años con un diámetro de 10.73 cm y el punto máximo del IMA es de 0.654 cm año⁻¹ correspondiente al cruce de estas dos curvas y corresponde al turno absoluto.

Si se considera el turno técnico a medidas comerciales y ajustándolo a un diámetro de 30 cm y comparando con edades superiores a este obtenemos ese diámetro a los 47 años en adelante el cual es el demandado por la industria maderera, obteniendo diferentes turnos técnicos dependiendo de las dimensiones del árbol (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cuadro de comparación de turnos técnicos con el turno absoluto del arbolado.

Edad (años)	Diámetro (cm)	Turno	ICA	IMA
41	26.81	Absoluto	0.6595	0.6539
47	30.48	Técnico (a 30 cm)	0.5781	0.6485
56	35.16	Técnico (a 35 cm)	0.4776	0.6279
68	40.21	Técnico (a 40 cm)	0.3771	0.5913

4.1.2 Crecimiento e incremento en altura

En relación a los datos de altura tomados del análisis troncal, el mejor modelo que se ajustó a su distribución y el que presentó los mejores valores de los parámetros estadísticos fue el modelo de Weibull con un valor de $R^2_{Adj} = 0.9793$ y $CME = 6.2089$ presentando muy poca diferencia entre los demás modelos que prácticamente tienen los mismos valores (Apéndice 2), en segundo lugar está el modelo de Chapman-Richards con $R^2_{Adj} = 0.9792$ y $CME = 6.2467$ como se observa, los valores son

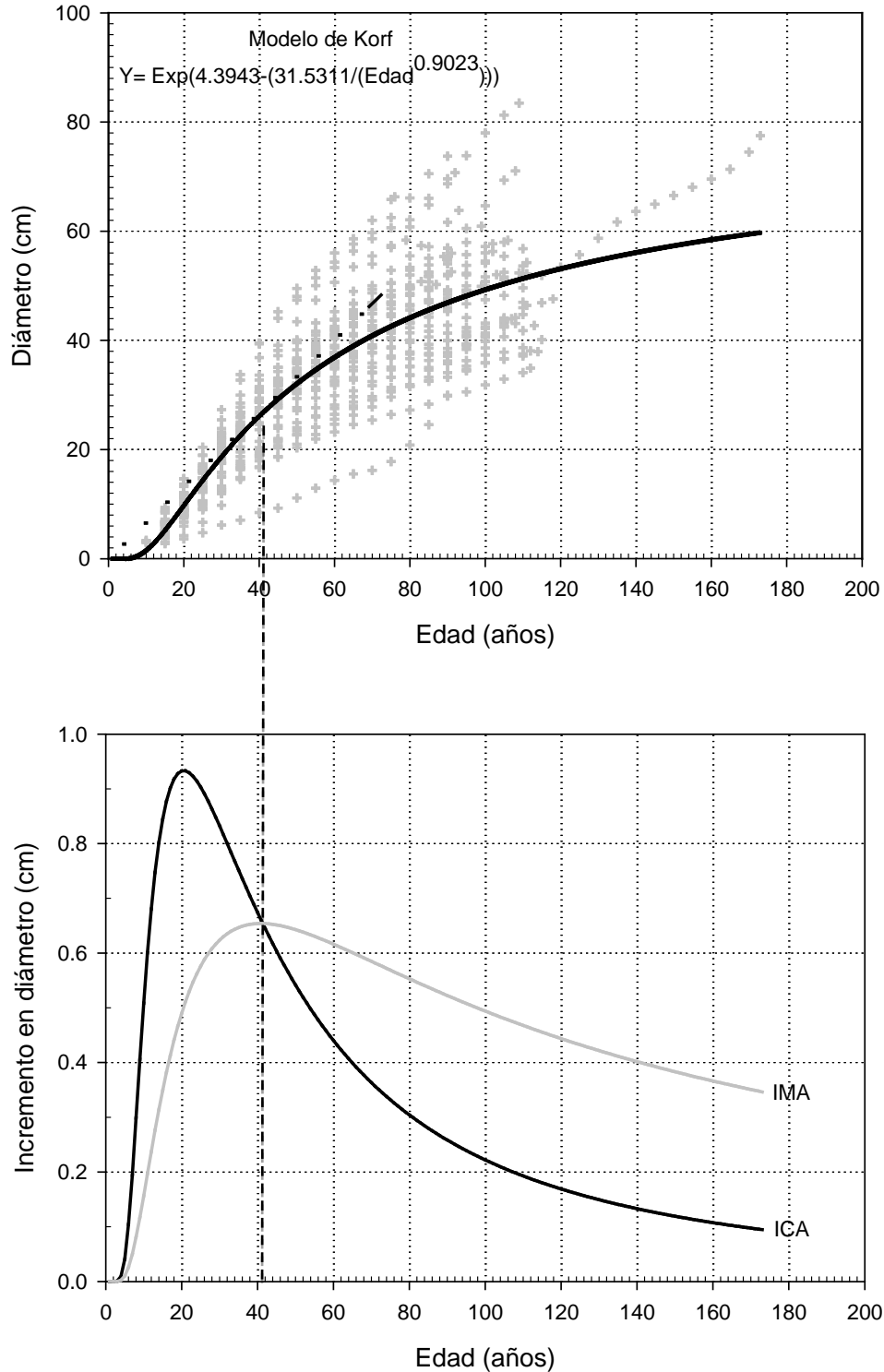


Figura 3. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de diámetro y curvas de ICA e IMA en relación a la variable diámetro. Las líneas punteadas representan el punto en el que se encuentra el turno absoluto.

parecidos, esto indica que todos los modelos probados pueden ser utilizados en la estimación de predichos con fines prácticos.

En relación con otros trabajos, este modelo ajustado en esta variable no se presenta comúnmente ya que ha presentado los mejores resultados en especies tropicales como es el caso de Sandoval (2010) en su trabajo crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales de plantaciones comerciales en Pochutla, Oaxaca, donde el modelo de Weibull presentó los mejores valores de R^2 igual que este trabajo, sin embargo, en otros trabajos para coníferas no coinciden con estos resultado, como es el caso de los trabajos de Corral y Navar (2005), Monárrez (2003), Calvillo (2003) donde el modelo que presentó el mejor ajuste para su familia de datos fue el de Chapman-Richards diferenciando con el resultado en este trabajo.

Con el modelo de Weibull se obtuvieron la familia de datos predichos que al compararlos con los datos observados se presenta un crecimiento rápido en los primeros años, después de ese crecimiento acelerado se presenta la disminución en el punto que intercepta la línea recta que inicia del punto 0 hasta tocar la curva predicha, que también corresponde al turno absoluto de la especie (Figura 4). Cerca de los 90 años se presenta un punto de estabilidad o punto de la fase recta, en la cual el crecimiento es estable.

El punto en el cual la recta toca a la curva estimada coincide con el punto en el que las curvas del ICA e IMA se interceptan (Figura 4), el valor de este punto corresponde a los 42 años con una altura de 17.23 m, valores de ICA de 0.4132 y valor de IMA máximo de 0.4102, esto corresponde al turno absoluto de la especie de *Pinus montezumae* Lamb., para la variable altura en esta región. También se puede observar que el ICA máximo de presenta a los 26 años con un valor de 0.5180 y una altura de 9.61 m.

La forma de crecimiento es diferente entre especies como es el caso para altura donde Calvillo (2003) encontró un turno absoluto de 32 años para *Pinus herrerae* Mart., en Cd. Hidalgo Michoacán, también Corral y Návar (2005) determinaron un turno absoluto para cinco Pináceas las cuales son *Pinus durangensis*, *P. cooperi*, *P. leiophylla*, *P. herrerae* y *P. engelmannii* con 40, 50, 25, 40 y 35 años respectivamente para cada especie.

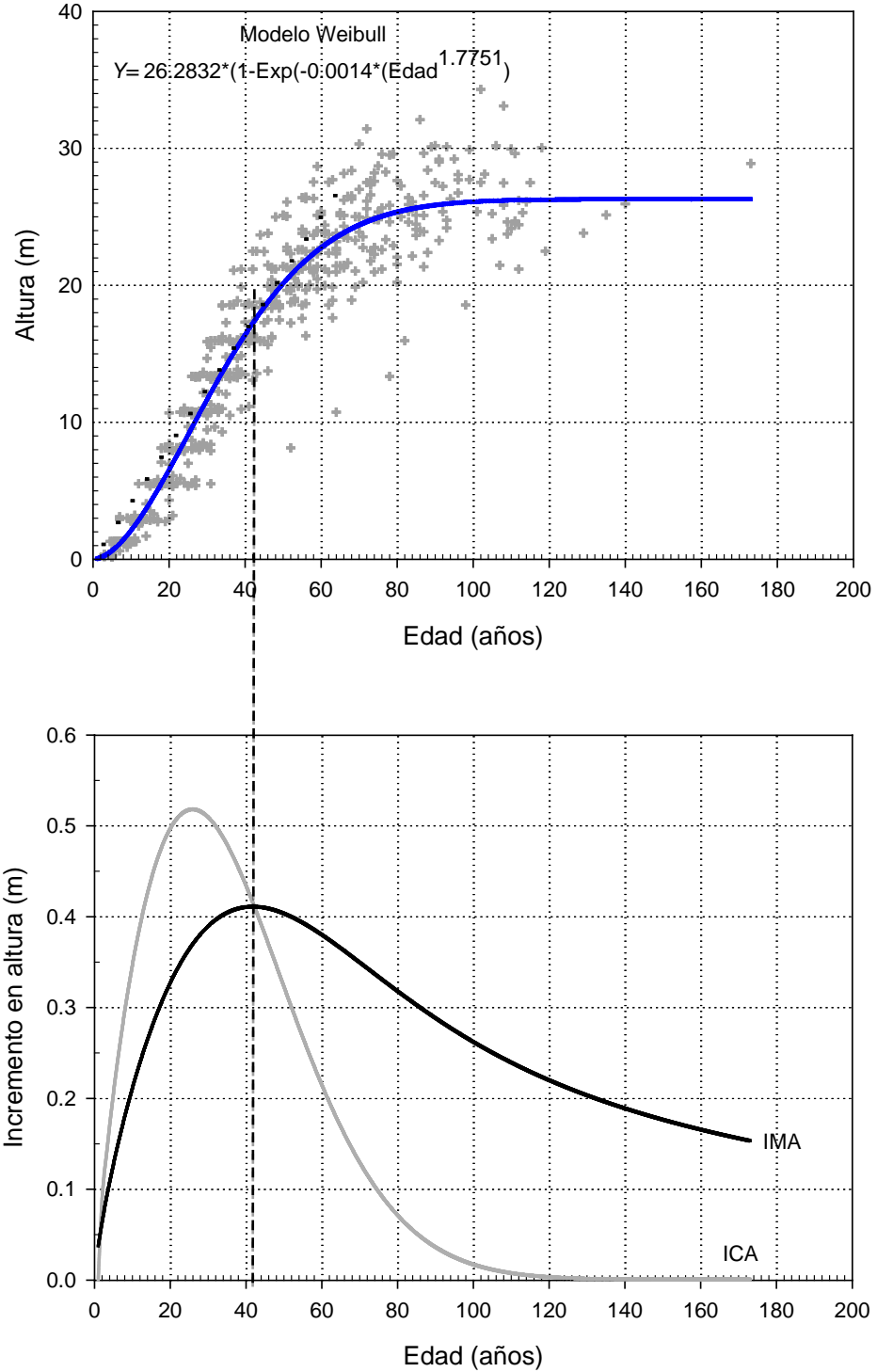


Figura 4. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de altura y curvas de ICA e IMA en relación a la variable altura. Las líneas punteadas representan el punto en el que se encuentra el turno absoluto.

Cuadro 9. Cuadro de comparación de turnos técnicos con el turno absoluto del arbolado en relación a la altura.

Edad (años)	Altura (m)	Turno	ICA	IMA
42	17.23	Absoluto	0.4132	0.4102
50	20.13	Técnico (a 20 m)	0.3229	0.4026
57	22.08	Técnico (a 22 m)	0.2453	0.3873
68	24.14	Técnico (a 24 m)	0.1441	0.3550

Como se observa en el Cuadro 9, la comparación del turno absoluto con 3 diferentes turnos técnicos que fueron tomados cada 2 m de altura, después de 17.23 m correspondiente a los 42 años, con esto se observa que después de los 50 años de edad los crecimientos empiezan a disminuir. Estos turnos técnicos son valores recomendados para el manejo forestal en el estado de Hidalgo, en base a una dimensión comercial establecida por la industria de aserrío.

4.1.3 Crecimiento e incremento en área basal

En relación a los datos de área basal, el mejor modelo que se ajustó a su distribución y el que presentó los mejores valores de los parámetros estadísticos para esta variable fue el modelo de Korf con un valor de $R^2_{Adj} = 0.8354$ y $CME = 0.00340$, presentando muy poca diferencia entre los demás modelos que también presentan un adecuado ajuste (Apéndice 3), en segundo lugar está el modelo de Schumacher con $R^2_{Adj} = 0.8339$ y $CME = 0.00342$ como se observa los valores son semejantes por lo tanto para la predicción de área basal se puede utilizar cualquiera de los modelos probados.

Es importante señalar que la variable diámetro, presentó también el mejor ajuste con el de Korf, donde los estadísticos de ajuste son similares con los otros modelos y representa la mejor manera la distribución del área basal así como para el cálculo del ICA e IMA, el modelo que le sigue al mejor ajuste es el de Schumacher y los restantes presentaron menores valores (Apéndice 3).

La curva de ajuste se construyó con el modelo de Korf y se compararon con el diagrama de dispersión donde se observa que hasta la edad donde los árboles se derribaron todavía presentan una tendencia creciente, lo cual hace que la curva predicha tenga una forma casi recta y el punto en el que intercepta la línea punteada a

la curva de ajuste, es el punto donde se hace una flexión de la curva correspondiente al turno absoluto de la especie y toma una forma de estabilidad en el crecimiento (Figura 5).

El punto en el cual la recta toca la curva estimada, coincide con el punto en el que las curvas del ICA e IMA se interceptan (Figura 5), el valor de este punto corresponde a los 104 años con un área basal de 0.2102 m², valores de ICA de 0.002030 y valor de IMA máximo de 0.00202124, esto corresponde al turno absoluto de la especie de *Pinus montezumae* Lamb., para la variable área basal en esta región. También se puede observar que el ICA máximo se presenta a los 48 años con un valor de 0.002582 y un área basal de 0.07936 m².

4.1.4 Crecimiento e incremento en volumen

Para volumen el modelo que presentó mejor ajuste fue el de Schumacher con un valor de $R^2_{Adj} = 0.8139$ y $CME = 1.2508$ presentando muy poca diferencia entre los demás modelos que también presentan un adecuado ajuste (Apéndice 4), en segundo lugar está el modelo de Korf con valores de $R^2_{Adj} = 0.8139$ y $CME = 1.2520$ los valores de estos dos modelos son iguales en R^2_{Adj} pero se tomó el de Schumacher porque tiene menos CME lo cual en esa parte tiene un mejor ajuste.

El punto en el cual la recta toca a la curva estimada coincide con el punto en el que las curvas del ICA e IMA se interceptan (Figura 6), el valor de este punto corresponde a los 110 años con un volumen de 4.3341 m³, valores de ICA de 0.395 y valor de IMA máximo de 0.0394001, esto corresponde al turno absoluto de la especie de *Pinus montezumae* Lamb., para la variable volumen en esta región. También se puede observar que el ICA máximo se presenta a los 55 años con un valor de 0.057973 y un volumen de 1.5959 m³.

El crecimiento e incremento en volumen a comparación de otras especies y en otras regiones es diferente como lo muestra Corral y Nívar (2005) donde los mayores incrementos se presentaron para *Pinus duranguensis* (0.012 m³ año⁻¹), seguido por *P. cooperi* (0.0115 m³ año⁻¹), *P. engelmannii* (0.011 m³ año⁻¹), *P. leiophylla* (0.008 m³ año⁻¹) y *P. herrerae* (0.0075 m³ año⁻¹) a edades de 59, 50, 44, 88, y 58 años

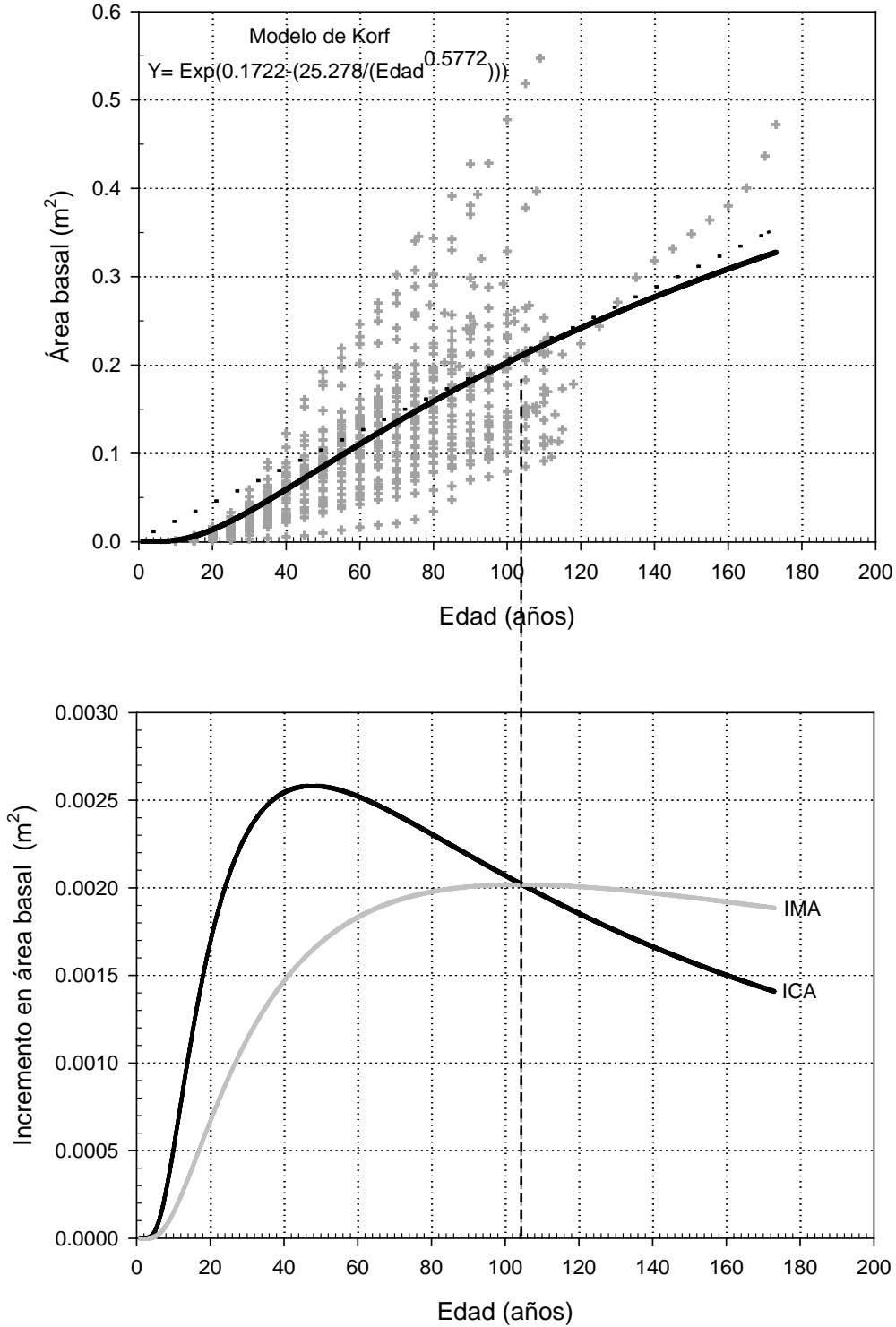


Figura 5. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de área basal y curvas de ICA e IMA en relación a la variable área basal. Las líneas punteadas representan el punto donde se encuentra el turno absoluto.

respectivamente. Los turnos absolutos del crecimiento en volumen fueron alcanzados antes de 100 años por *P. engelmannii* (70), *P. cooperi* (80), *Pinus duranguensis* (95), y después de este tiempo por *P. herrerae* (105) y *P. leiophylla* (155 años).

4.1.5 Comparación de turnos y distribución de productos a diferentes edades

La diferencia en la utilidad de los turnos depende del objetivo del aprovechamiento o el uso de la materia prima, en este caso es la industria forestal la que determina las dimensiones comerciales, como ya anteriormente se obtuvo el turno absoluto por las variables diámetro, altura, área basal y volumen, 41, 42, 104 y 110 años respectivamente. Sin embargo, para fines prácticos en el manejo forestal, el turno más recomendable y práctico es el turno técnico para la especie de *Pinus montezumae* Lamb. ya que los turnos técnicos están por encima del turno absoluto. Para esto se deben determinar la productividad a ciertas dimensiones de diámetro, que es la variable más importante en las exigencias del mercado de aserrío.

Cuadro 10. Comparación de la producción de turno absoluto y turno técnico, en relación a un diámetro establecido como medida de corta (30, 35 y 40 cm).

Turno	Edad (años)	Altura (m)	Volumen (m ³)	Distribución de productos (m ³)				
				LD	CD	MC	LC	D
Absoluto en diámetro (26.81 cm)	41	16.81	0.8066	0.4840	0.2017	0.0242	0.0565	0.0403
Técnico (a 30 cm)	47	19.13	1.1358	0.6815	0.2839	0.0341	0.0795	0.0568
Técnico (a 35 cm)	56	21.83	1.6538	0.9923	0.4135	0.0496	0.1158	0.0827
Técnico (a 40 cm)	68	24.14	2.3383	1.4030	0.5846	0.0701	0.1637	0.1169

LD: largas dimensiones, CD: cortas dimensiones, MC: material celulósico, LC: leña para combustible, D: desperdicios.

Se definieron diámetros deseables de extracción para la industria forestal, que por las necesidades se fija en 30, 35 y 40 cm, con estos diámetros se define el turno

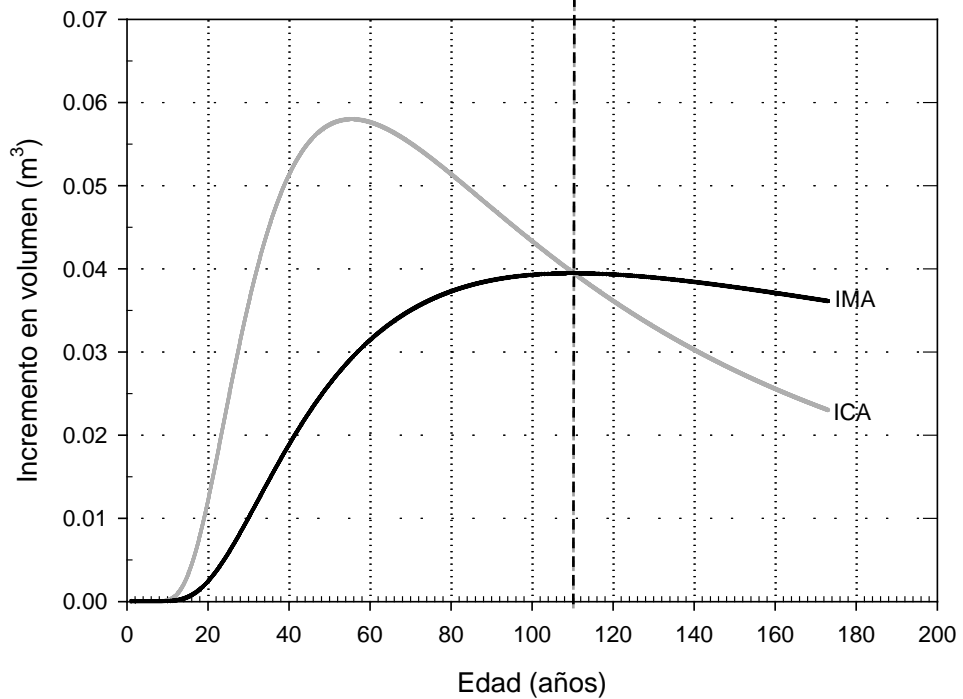
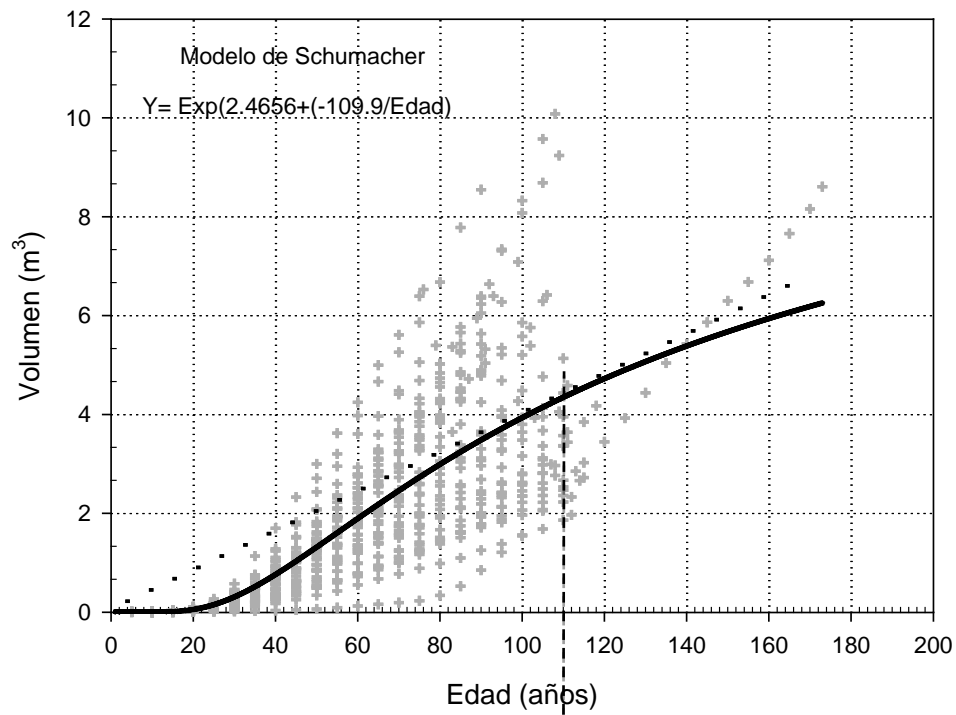


Figura 6. Diagrama de dispersión de los datos con la línea de ajuste del mejor modelo para la variable de volumen y curvas de ICA e IMA en relación a la variable volumen. Las líneas punteadas representan el punto donde se encuentra el turno absoluto.

técnico según las necesidades y objetivos del manejo forestal; a dichos diámetros corresponden turnos técnicos de 47, 56 y 68 años respectivamente. En comparación con el turno absoluto en diámetro que se presenta a los 41 años y con un valor de 26.81 cm, son dimensiones muy delgadas e inadecuadas para el aserrío, lo que es más rentable utilizar un turno técnico, aunque sea más largo, pero con mayores dimensiones Cuadro 10.

En relación a las diferentes edades marcadas, se puede observar (Cuadro 10), que la producción en volumen (m^3) del árbol va en aumento conforme alargamos el turno técnico, así como la altura también presenta aumentos considerables en la longitud del árbol.

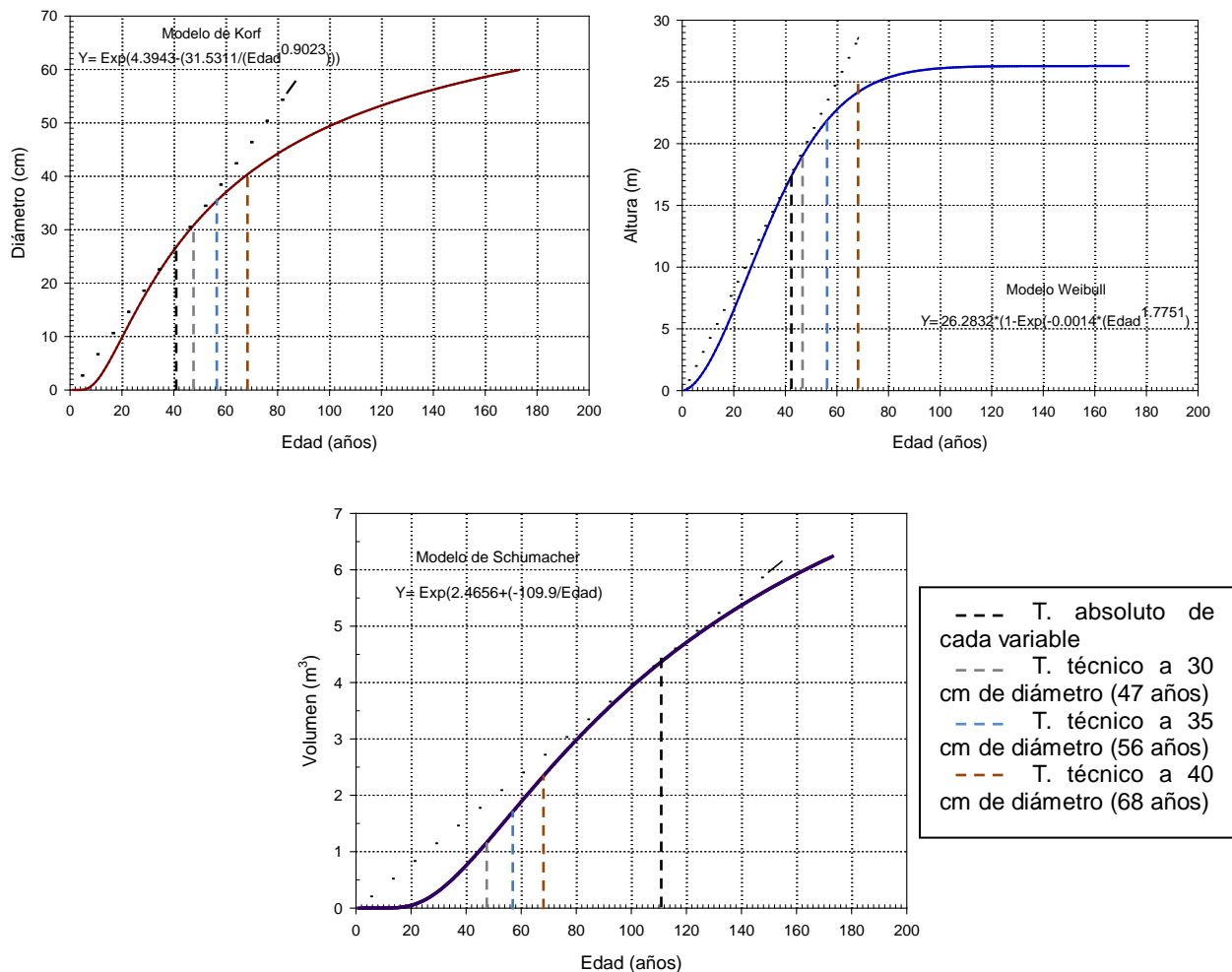


Figura 7. Curva de ajuste para diámetro (superior izquierda), altura (superior derecha) y volumen (inferior centro) con los diferentes turnos técnicos comparados con el turno absoluto de *Pinus montezumae* Lamb.

Lo anterior aclara la proyección de los valores de turno técnico que se observa en la Figuras 7, donde la comparación de los turnos en relación con la curva de ajuste y la intercepción de la tangente corresponde a los diferentes turnos establecidos, turno absoluto y técnico, este último con dimensiones establecidas.

4.2 Determinación de índice de sitio

El modelo de Schumacher presentó buen ajuste con la familia de datos de edad-altura, siendo este el que constituya la curva guía o promedio con la que se utilizará como base para la construcción de la familia de curvas anamórficas y polimórficas, los valores presentados por el modelo en el ajuste son adecuados como es una $R^2_{adj} = 0.9813$ y un $CME = 5.5256$ (Apéndice 5), parámetros estadísticos significativos que permitan obtener resultados para este estudio, como es la curva de ajuste la cual se muestra en la Figura 8.

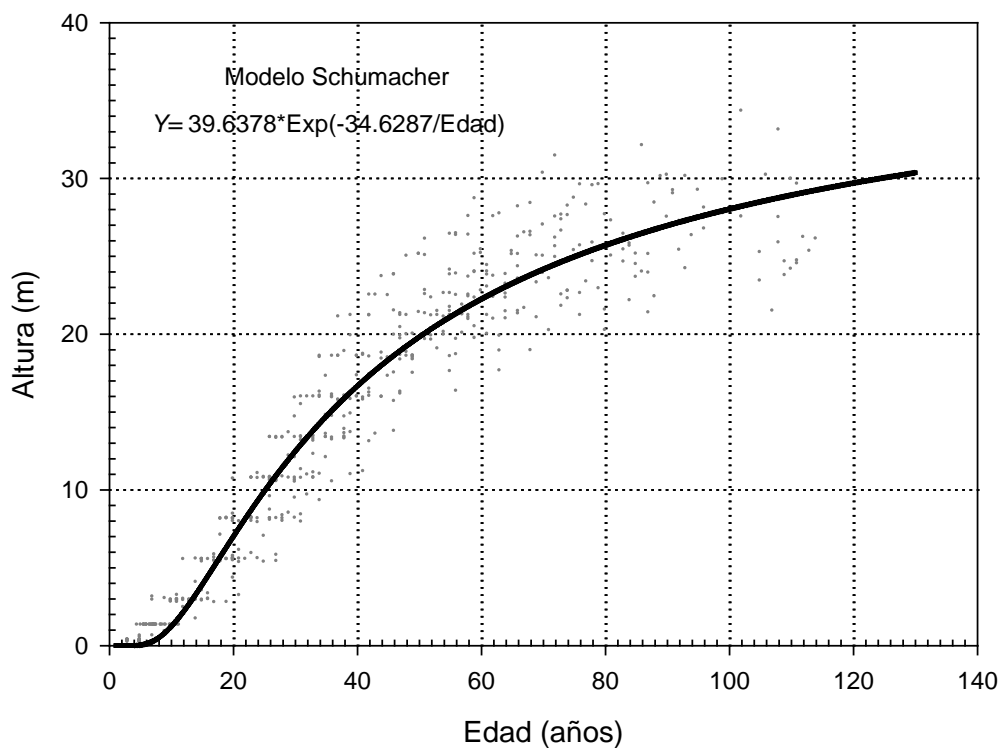


Figura 8. Curva guía obtenida con el modelo ajustado para la creación de la familia de curvas.

4.2.1 Determinación de la edad base

Para la estimación de los índices de sitio se optó por utilizar una edad base determinada con el cruce de las curvas de ICA e IMA (Figura 9), calculados de la forma básica de la diferencias de medidas entre la diferencia de edades, el punto máximo de IMA (Apéndice 6) y el punto en el que la recta se convierte en la tangente de la curva (Figura 10) de los valores de altura que se estimaron con el modelo ajustado; el valor de la edad base que se obtuvo fue de 35 años de edad.

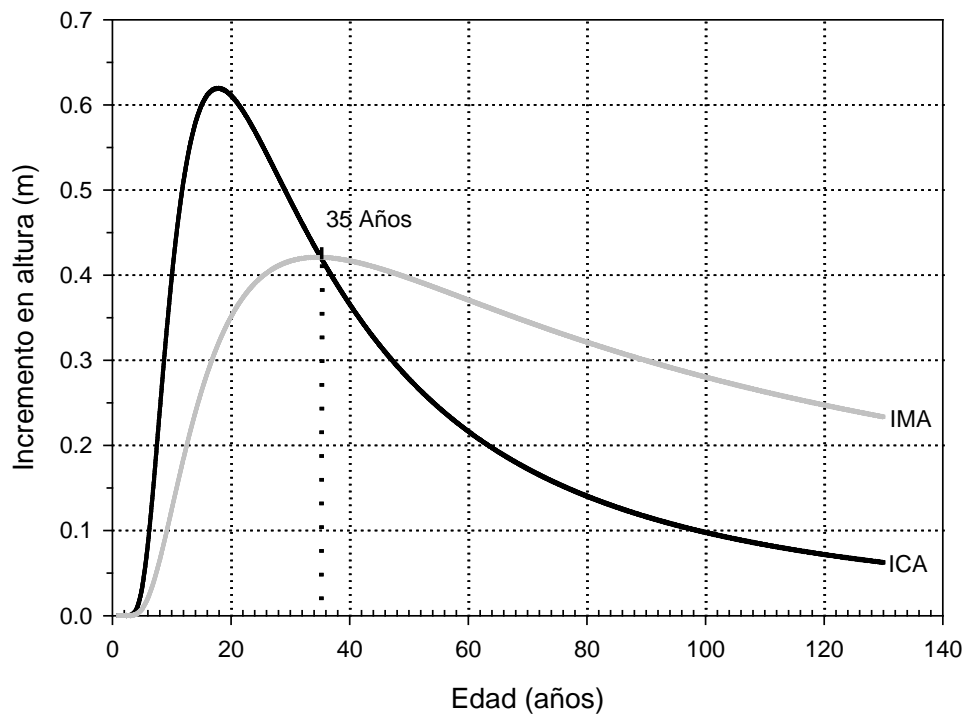


Figura 9. Curvas de ICA e IMA mostrando un cruce a los 35 años valor de edad base.

La edad base en relación al cálculo del índice de sitio para otros trabajos es semejante en alguno como es el caso de Mares (2003), determinó para *Pinus herrerae* Martínez en la Región de Cd. Hidalgo, Michoacán una edad base de 32 años, variando 3 años para *Pinus montezumae* Lamb., para el Sureste del Estado de Hidalgo respectivo para este trabajo, ya que tienen una distribución muy similar en el desarrollo de las dos especies; para otra conífera Ruíz (2011), determinó edad base diferentes para cada tipo

de curvas como es 60 años para la familia de curvas anamórficas y 50 años para curvas polimórficas, esto para la especie de *Pinus patula* Schl. et Cham., en Ixtlán de Juárez, Oaxaca.

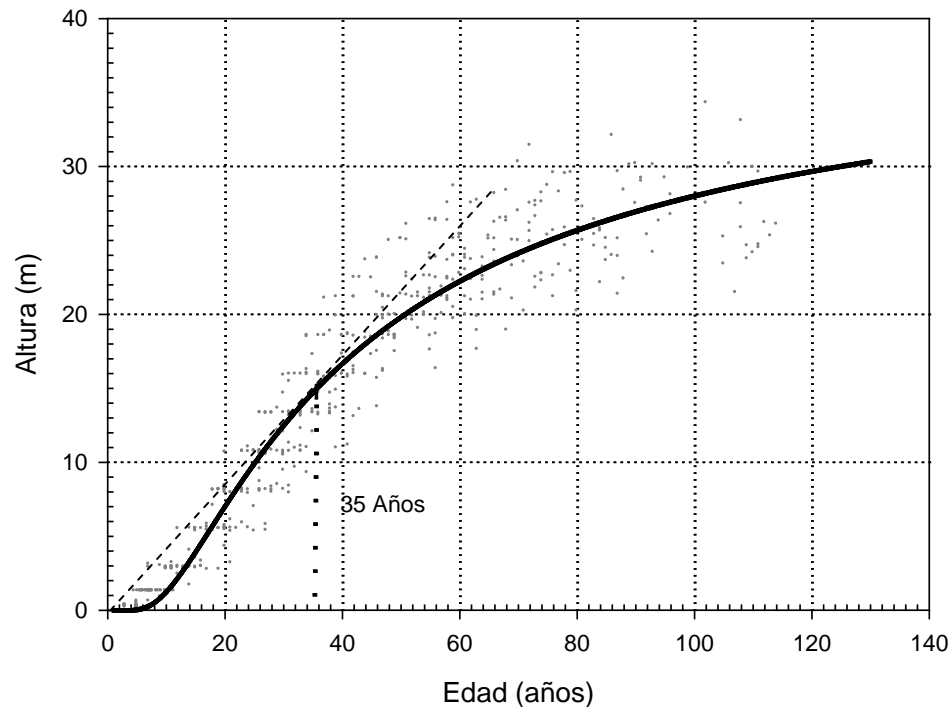


Figura 10. Curva guía interceptada por la línea tangente en el punto de 35 años, marcado como la edad base de *Pinus montezumae* Lamb.

Zepeda y Rivero (1984) establecen en su trabajo construcción de curvas anamórficas de índice de sitio con el método de la curva guía, una edad base según gráfica de ICA e IMA de 48 años que como fines más prácticos para el manejo forestal y la distribución de las áreas de cortas la establecieron arbitrariamente a 50 años. Otro caso particular es Coronado (1997), donde establecieron para *Pinus oocarpa* Schiede varias edades bases a 30, 35 y 40 años y para ellas se establecieron cinco calidades de estación, lo que hace a consideración tomar la edad base según el objetivo del manejo forestal y las dimensiones del arbolado.

4.2.2 Curvas anamórficas de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb.

Para la construcción de la familia de curvas anamórficas se utilizaron datos de 36 árboles que fueron analizados con el modelo de Schumacher y con este se determinó la curva guía o promedio que se observa en la Figura 8, la cual se utilizó para poder realizar la familia de curvas. Los valores obtenidos en el análisis estadístico de los datos se sustituyeron en el modelo de Schumacher de su forma anamórfico para construir la familia de curvas de índice de sitio y la ecuación sustituida fue la siguiente:

$$H = \left(\frac{IS}{e^{(-34.6287/35)}} \right) e^{(-34.6287/E)}$$

Utilizando el modelo anterior sustituido y a una edad base de 35 años, se generaron cinco curvas de índice de sitio, con equidistancia arbitraria de dos metros entre curva para tener una buena distribución entre el diagrama de dispersión (Figura 11). Estas curvas presentan la misma forma ya que el parámetro B_1 (valor de la pendiente de la curva) se mantuvo el mismo valor para las cinco curvas realizadas. Los valores de índice de sitio fueron 10.74, 12.74, 14.74, 16.74 y 18.74 m respectivamente para cada curva, observando que la mayor altura obtenida para la edad de 35 años fue de 18.74 m, donde en la familia de curvas anamórficas muestran que es el máximo crecimiento promedio de la mejor calidad de estación para *Pinus montezumae* Lamb., para la región Sureste del Estado de Hidalgo

En base a los índices de sitio establecidos, correspondió a cinco calidades de estación donde se marcaron con números romanos que van del I, II, III, IV y V, tomados de mayor a menor valor de producción en altura. Estas representan 5 zonas productivas y los valores se muestran en el Cuadro 11.

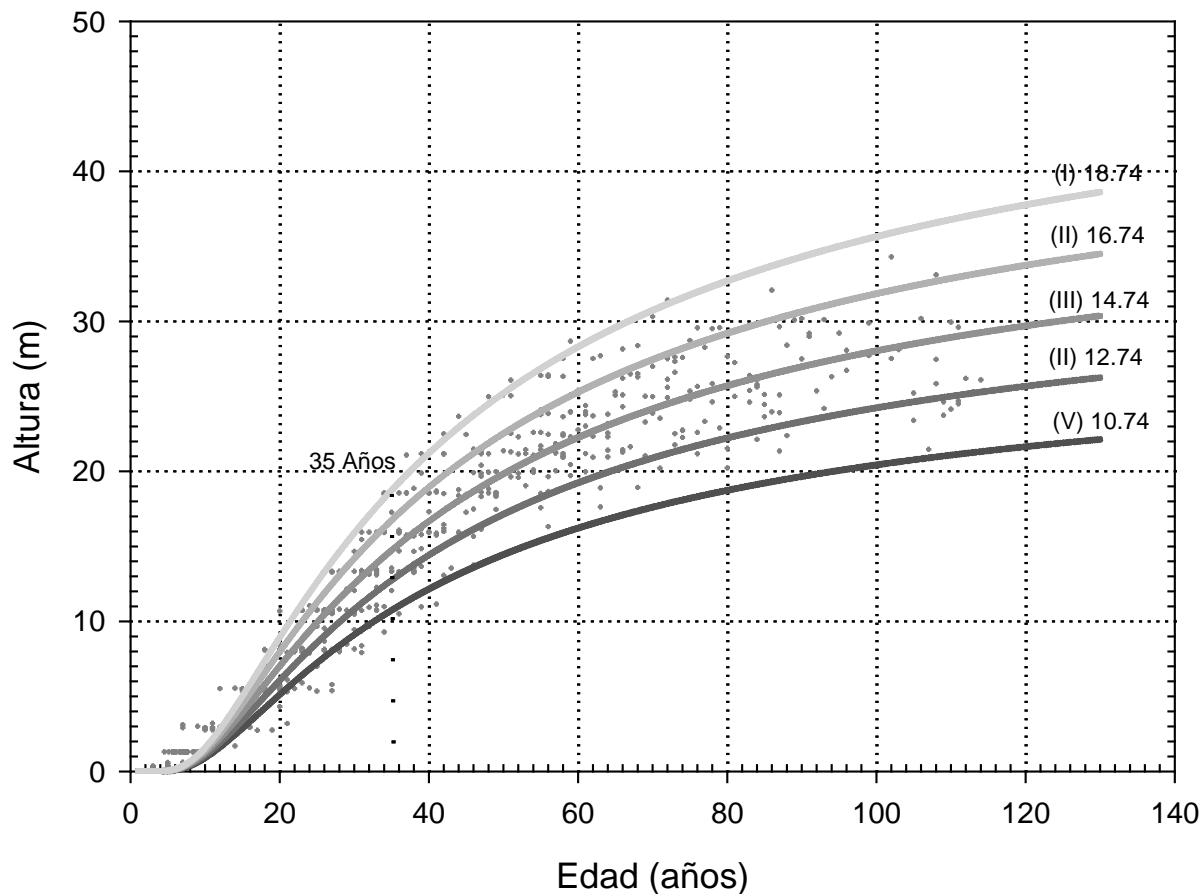


Figura 11. Familia de curvas anamórficas de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb., a una edad base de 35 años y una amplitud de dos metros entre curva.

Cuadro 11. Calidades de estación, valores de índice de sitio (IS) y el rango de amplitud de cada calidad a una edad de 35 años para *Pinus montezumae* Lamb.

Calidad de estación	Índice de sitio (m)	Rango de valor del IS (m)
I	18.74	19.74 - 17.74
II	16.74	17.73 - 15.74
III	14.74	15.73 - 13.74
IV	12.74	13.73 - 11.74
V	10.74	11.74 - 9.74

Se identificó a cada calidad de estación establecida como Muy buena (I), Buena (II), Regular (III), Mala (IV) y Muy mala (V), así como los rangos que abarca cada calidad establecida, con un rango de un metro hacia arriba y uno hacia abajo en todas las calidades estableciendo como dos metros de apertura de cada calidad.

Tratar de clasificar los terrenos forestales según su producción utilizando edad y altura dominante de especies de coníferas con el método anamórfico es muy amplio, por ejemplo en el trabajo de Ruíz (2011) se generaron cinco curvas anamórficas con el modelo de Schumacher para *Pinus patula* Schl. et Cham., en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, con valores de índice de sitio de 21, 24, 27, 30 y 33 metros, con una equidistancia de tres metros entre curva a la edad base de 60 años. Estos resultados son muy diferentes en relación con los obtenidos en este estudio, ya que la especie de *Pinus montezumae* Lamb., es de menor crecimiento que *Pinus patula* Schl. et Cham. donde se observan índices de sitios mayores.

Sin embargo, hay especies que tienen diferente crecimiento debido al sitio en el que se desarrollan como lo muestran Benavides y Manzanilla (1993) donde estimó la calidad de estación mediante índices de sitio para dos especies de pinos en Tapalpa, Jalisco, donde obtuvo para *Pinus michoacana* var. *cornuta* Martínez, con el análisis de 25 árboles, tres curvas de índice de sitio con valores de 31.89, 25.89 y 19.89 m con intervalos entre curvas de 6 m a una edad base de 45 años y para *Pinus oocarpa* Schiede, también se establecieron tres índices de sitio con valores 21.06, 17.56 y 14.06 m respectivamente, utilizando un intervalo de 3.5 m, a una edad base de 45 años.

4.2.3 Curvas polimórficas de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb.

Al igual que la construcción de la familia de curvas anamórficas, se utilizó la curva promedio obtenida con el modelo de Schumacher en su forma exponencial y en base a los parámetros se sustituyeron en el modelo en su forma polimórfica el cual se utilizó para construir la familia de curvas empleando la curva guía establecida (Figura 8) y que representara por completo al diagrama de dispersión y la ecuación quedó de la siguiente manera:

$$H=39.6378*\left(\frac{IS}{39.6378}\right)^{\left(\frac{35}{EAD}\right)}$$

La familia de curvas polimórficas está estructurada de cinco curvas construidas con el modelo anterior, donde presenta variable al parámetro B_1 que representa la pendiente de las curvas, lo que da como resultado curvas diferentes en la tendencia de crecimiento. Se tomó una edad base de 35 años con equidistancia entre curvas de tres metros para que representara adecuadamente la dispersión de los datos observados de los 36 árboles analizados.

Se crearon curvas polimórficas de tipo articuladas, debido a que no se cruzaron en ningún momento del crecimiento, aunque cada una de ellas se comporta diferente al no presentar paralelismo entre sí, pero terminan juntándose al culminar la vida natural del árbol (Figura 12). Se obtuvieron cinco índices de sitio con valores de 20.74, 17.74, 14.74, 11.74 y 8.74, respectivamente para cada curva construida y de acuerdo a estos resultados también se dividieron en cinco calidades de estación que se etiquetaron con números romanos que van de I, II, III, IV y V de mayor a menor calidad de estación nombrándolas como Muy buena, Buena, Regular, Mala y Muy mala respectivamente para cada numeración romano establecida. Los rangos de amplitud para cada valor de estación se muestran en el Cuadro 12.

En las curvas polimórficas a diferencias de las anamórficas presentan más alto valor de índice de sitio y un menor valor en la calidad baja, debido que las polimórficas fueron construidas a una amplitud de tres metros, lo que ocasiona una amplitud de I a V más amplia que en curvas anamórficas. Las familias de curvas representan una amplia relación funcional entre la edad y la altura, para la estimación del índice de sitio como indicador de productividad de un sitio para una especie dada.

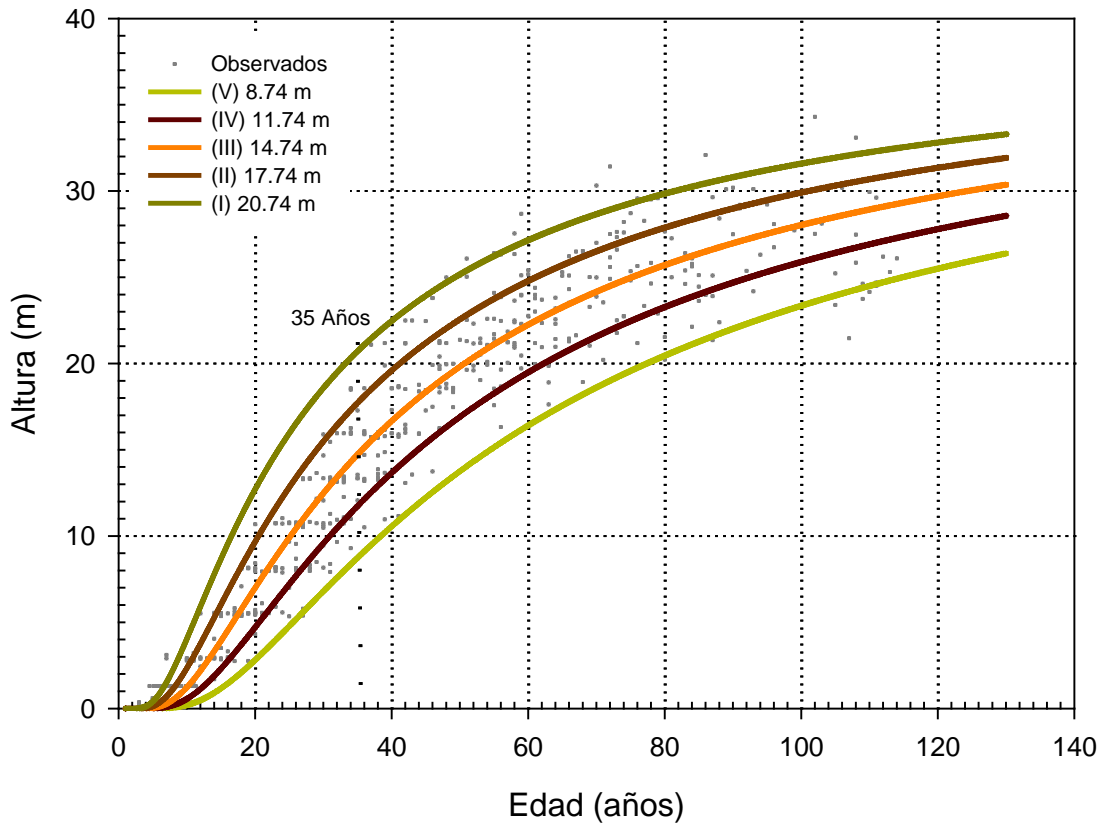


Figura 12. Familia de curvas polimórficas de índice de sitio para *Pinus montezumae* Lamb., a una edad base de 35 años.

Cuadro 12. Calidades de estación, valores de índice de sitio (IS) y el rango de amplitud de cada calidad a una edad de 35 años para *Pinus montezumae* Lamb.

Calidad de estación	Índice de sitio (m)	Rango de valor del IS (m)
I	20.74	22.24 - 19.24
II	17.74	19.23 - 16.24
III	14.74	16.23 - 13.24
IV	11.74	13.23 - 10.24
V	8.74	10.23 - 7.24

Trabajos que utilizan curvas polimórficas para clasificar la producción de los rodales son Rodríguez y Arteaga (2005) utilizaron los modelos polimórficos de Chapman-Richards y Payandeh y Wang, con los que formo la familia de curvas para *Pinus chapensis* (Martínez) Adresen, donde se fijaron según la amplitud de la dispersión de los datos de altura tres índices de sitio: 20, 25 y 30 m a la edad base de 25 años. Las familias de curvas presentan un comportamiento en la tendencia de crecimiento parecido a los resultados para *Pinus montezumae* Lamb., para el área de estudio.

Otro trabajo fue presentado por Mares (2003) donde generó cinco curvas polimórficas de índice de sitio con el modelo tipo polimórfico de Chapman-Richards, para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán, donde los correspondientes valores de índice de sitio son 15.5, 18.5, 21.5, 24.5 y 27.5 m, con una amplitud de tres metros a una edad base promedio de 40 años, cabe mencionar que los resultados obtenidos por este autor y al compararlos con el presente trabajo, presentan mucha similitud ya que la amplitud se hizo a tres metros, la edad solo varia cinco años a la establecida y *Pinus herrerae* Martínez presenta mayor crecimiento que *Pinus montezumae* Lamb., atribuyendo esto a que las calidades de estación sean diferentes o mejores para el primer pino.

5 CONCLUSIONES

Los turnos estimados para *Pinus montezumae* fueron diferentes dependiendo de las variables dasométricas y los modelos ajustados; para diámetro fue 41, para altura 42, para área basal 104 y para volumen 110 años en la región sureste del Estado de Hidalgo.

Los turnos técnicos recomendados considerando la variable de diámetro fueron de 30, 35, y 40 cm a 47, 56 y 68 años de edad respectivamente.

Se construyeron familia de curvas anamórficas y polimórficas, obteniendo cinco índices de sitio a una edad base de 35 años, donde las curvas polimórficas son las adecuadas.

6 RECOMENDACIONES

Al utilizar la metodología de análisis troncal para realizar la extracción de datos de la vida completa del arbolado se debe de realizar con más tiempo para poder obtener las muestras contemplando el tiempo de corte, secado y análisis para que así se aumenta el tamaño de muestra y obtener resultados más confiables con la distribución de la especie en cuestión.

En base a los índices de sitio establecidos para esta especie en la región sureste del estado de Hidalgo, es recomendable emplearlo para la rodalización del territorio y poder agrupar la superficie por cada índice, esto utilizándolo para determinar las superficies adecuadas de corta para cumplir con la remoción establecida en el programa de manejo forestal de acuerdo al potencial productivo del sitio, metodología establecida en el método de desarrollo silvícola

Es bueno comparar las curvas anamórficas y polimórficas para la determinación de la calidad de estación para tener una mejor representación en la producción máxima y mínima del sitio o región en estudio.

7 LITERATURA CITADA

- Aguilar R., M. 1997. Estudio del crecimiento de *Pinus douglasiana* Martínez y *Pinus lawsonii* Roehl., en la región central de Michoacán. Revista Ciencia Forestal en México. 22:42-70.
- Aguirre C., O. A. y Zepeda B., E. M. 1985. Estimación de índices de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl., de la región de Iturbide, Nuevo León. Ciencia Forestal en México. 10:50-64.
- Alder D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento, con referencia especial a los trópicos Vol. 2. Predicción del rendimiento. FAO Montes. 2(22).118 p.
- Amparo L., M. y M. Almeida (S.F.). Determinación del turno óptimo de aprovechamiento de la especie *Lysiloma latissiliquum* Benth, considerando múltiples criterios. Universidad de Pinar del Río, Cuba. 12 p.
- Andenmatten E. y F. Letourneau. 1997. Curvas de índice de sitio para *Pinus ponderosa* (Dougl.) Law de aplicación en la región Andino Patagonia de Chubut y Río Negro, Argentina. Revista Bosques 18(2):13-18.
- Andenmatten E. y F. Letourneau. 2000. Curvas de índice de sitio y crecimiento en altura, para Pino Oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb) Franco), de aplicación en la región Andino Patagonia de Chubut y Río negro, Argentina. Informe técnico. 9:10.
- Benavides S., J. de D. 1991. "Índices de sitio" para estimar la "calidad de sitio" en bosques de coníferas. Ciencia Forestal. 16:3-33.
- Benavides S., J. D. y H. Manzanilla B. 1993. Estimación de la "calidad de sitio" mediante "índices de sitio" de *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el ADF Tapalpa, Estado de Jalisco. Ciencia Forestal de México. 18:121-138.
- Benavides S., L. D. 1987. Estimación de la calidad de sitio mediante índices de sitio del *Pinus michoacana cornuta* Martínez y *Pinus oocarpa* Schiede, para el A.D.F Tapalpa, Estado de Jalisco. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 79 p.

- Calvillo G., J. C. 2003. Estudio epidométrico para *Pinus herrerae* Mart., en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. 80 p.
- Cancino J. 2002. Dendrometría básica. (En línea). <http://www.sibudec.cl/ebook/buscar.php?mat=3#>.
- COAFA S. P. R. de R. I. 2010. Ajuste al programa de manejo forestal nivel avanzado para el aprovechamiento forestal maderable del ejido Santo Tomás, municipio de Zempoala, Hidalgo. Tulancingo, Hidalgo. 72 p.
- Corral R., S. y J. J. Návar C. 2005. Análisis del crecimiento e incremento de cinco Pináceas de los bosques de Durango, México. *Madera y Bosques*. 11(001):29-47.
- CONAGUA-Subdirección Técnica. 2007. Regiones hidrológicas. Escala 1:250,000. México, D. F.
- Coronado L., S. F. 1997. Determinación de índice de sitio para *Pinus oocarpa* Schiede., en dos localidades de Chiquimula. Tesis profesional. Universidad de San Carlos de Guatemala. 53 p.
- Cruz C., F. 2007. Modelos de volumen y crecimiento en altura dominante para *Pinus cooperi* Blanco en el estado de Durango, México. Tesis de Doctorado. Colegio de postgraduados, Montecillos, Texcoco, Estado de México. 69 p.
- Díaz B., L. 1997. Turno forestal económicamente óptimo: Una revisión. *Economía agraria*. Universidad Politécnica de Madrid. pp. 181-224.
- Hernández L., I. 2003. Crecimiento de tres especies de pino plantadas bajo dos tratamientos silvícolas en Santiago Comaltepec, Ixtlán, Oaxaca. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. 100 p.
- INEGI. 2009 Guía para la interpretación de cartografía uso del suelo y vegetación, escala 1:250 000. Serie III/ Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México, D.F. p. 74.
- INEGI. 2011. Principales suelos de México (En línea). <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/datosgeogra/fisigeo/principa.cfm>
- INIFAP-CONABIO. 1995. Carta digital de edafología. Escala 1:250,000.

- Farjon A. y B. T. Styles. 1997. Flora neotropical *Pinus* (Pinaceae). The New York Botanical Garden, New York, E.U. 291p.
- Franco A., R. C., E. H. Cornejo O., S. Valencia M. y J. A. Villarreal Q. 2003. Asociación del índice de sitio de *Pinus montezumae* Lamb. con variables ambientales y vegetación en Cd. Hidalgo, Michoacán. AGROFAZ. 3(1):288-297.
- García C., X., H. Ramírez M., C. Rodríguez F., J. Jasso M. y C. A. Ortiz S. 1998. Índice de sitio para Caoba (*Swietenia macrophylla* King) en Quintana Roo, México. Revista Ciencia Forestal de México. 23:9-18.
- García E. – CONABIO. 1998. Climas (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1, 000,000.
- Gómez-Tejero, J. Santos-Posada, H. M. Fierro-González, A. M. Valdez-Lazalde y J. Rene. 2009. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* Hill ex maiden y *E. urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México. Revista Fitotecnia mexicana. 32(2):161-169.
- Grijpma I. P. 1990. Manual para educación agropecuaria: producción forestal. Segunda edición. Editorial Trillas, México, D.F. 134 p.
- INEGI. 2011. Principales suelos de México. Escala 1:1, 000,000.
- Iturre C., M. y P. Araujo A. 2006. Crecimiento y producción del rodal regular. Universidad Nacional de Santiago. p. 75.
- Jerez R., M., A. Y. Moret B., O. E. Carrero G., R. E. Macchiavelli y A. M. Quevedo R. 2011. Curvas de índice de sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en los llanos de Venezuela. Agrociencia. pp: 135-145.
- Madrigal H., S. y H. Ramírez M. 1996. Las propiedades edáficas en la determinación del Índice de Sitio para dos especies de pinos en Uruapan, Michoacán. Revista Ciencia Forestal en México. 21(79):3-14.
- Madrigal H., S., J. Moreno C. e I. Vázquez C. 2004. Comportamiento de dos métodos de la predicción y representación gráfica del índice de sitio. Revista Ciencia Forestal en México. 29:23-41.

- Mares A., O. 2003. Índice de sitio para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. p. 85.
- Martínez P., G., M. Vanessa L., R. Vukasovic, P. Peri y J. M. Cellini. 2004. Turno de corta y posibilidad de los bosques de lenga (*Nothofagus pumilio*) en tierra del fuego (Argentina). *Bosques*. 25(1):29-42.
- Monárrez G., J. C. 2003. Predicción y rendimiento en masas específicas de *Pinus durangensis* Mtz., en el estado de Durango. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo, México. 98 p.
- Monroy R., C. R. 1996. Índice de sitio para *Pinus patula* Schl. Et Cham. en la región de Huayacocotla, Estado de Veracruz. *Ciencia Forestal de México*. 21:57-77.
- Mora F. y V. Meza. 2003. Comparación del crecimiento en altura de la Teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo. Instituto de Investigación y Servicios Forestales, Universidad Nacional de Costa Rica. 22 p.
- Ortega A. y G. Montero. 1988. Evaluación de la calidad de las estaciones forestales. Revisión Bibliográfica. *Revista Ecología*. 2:155-184.
- Padilla G., H. 1987. Glosario práctico de términos forestales. Primera edición. Editorial Limusa. Universidad Autónoma Chapingo, México, D. F. 273 p.
- Perry P., J. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press, Inc. Portland, Oregón, E. U. 231 p.
- Rodríguez L., R., R. Razo Z., D. Díaz H. y J. Meza R. 2009. Guía de densidad para *Pinus montezumae* en su área de distribución natural en el Estado de Hidalgo. Folleto Técnico No. 1. Fundación Hidalgo Produce A.C. Pachuca, Hidalgo. 30 p.
- Rodríguez F., C. 1997. La silvicultura de *Pinus montezumae* Lamb. en la región central de México. *Revista Ciencia Forestal de México*. 22(81):91-115.
- Rodríguez A., M. y B. Arteaga M. 2005. Índice de sitio para *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen, en los estados de Veracruz y Puebla, México. *Revista Chapingo*. 11(1):39-44.
- Rojo M., G. E., J. Jasso M., X. Zazueta A., C. R. Porrás A y A. Velázquez M. 2005. Modelos de índice de sitio para *Hevea brasiliensis* Mull. Arg. del clon IAN.710 en

- el norte de Chiapas. Revista Ra Ximhai. Universidad Autónoma Indígena de México. 1(1):153-166.
- Ruíz A., P. 2011. Índice de sitio y predicción de la altura en base al diámetro para *Pinus patula* Schl. et Cham., en Ixtlán, Oaxaca. Tesis profesional. Universidad de la Sierra Juárez, Oaxaca. 75 p.
- Salinas C., E., R. González S., J. Quintela F., S. Montiel R., J. J. Domínguez T., V. Escalante R., A. Conde A., F. Chávez A., L. Serrano P., A. Cuevas M., A. Rodríguez G., H. García M., J. Pablo C., J. Romo N., F. A. Damián G. y A. J. Damián G. 2001. Gobierno del Estado de Hidalgo: Ordenamiento Ecológico Nacional. Hidalgo, México. 307 p.
- Sánchez C., O. D. 2011. Propuesta de manejo forestal sustentable para Comunidad Indígena Crescencio Morales del mpio. de Zitácuaro, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México. 100 p.
- Sandoval G., R. 2010. Crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales de plantaciones comerciales en Pochutla, Oaxaca. Tesis profesional. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila. 68 p.
- Santiago G., W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría. Colegio de postgraduados Campus Montecillos, Texcoco, Estado de México. 78 p.
- SARH-SF. 1985. Normas mínimas de calidad para la formulación de estudios dasonómicos en bosques. Dirección General de Aprovechamientos Forestales, México, D. F. 298 p.
- Sit, V. y M. Poulin-Costello. 1994. Catalogue of curves for curve fitting. Biometrics Information. Handbook No.4. Ministry of Forest Research Program. British Columbia. 110 p.
- Spurr H., S. y B. V. Barnes. 1980. Ecología forestal. Primera edición en español. A. G. T. Editor S. A. Progreso, México, D.F. 690 p.
- Torres R., J. M. 2001. Curvas de índice de sitio de forma y escala variables en investigación forestal. Revista Agrociencia. 35:87-98.
- Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de plantaciones forestales. Primera edición. Editorial Limusa, México, D.F. 472 p.

- Torres R., J. M. y A. G. Valles G. 2007. Índice de productividad de sitios multiespecíficos a través de funciones de distancia en sitios forestales. *Agrociencia*. 41:687-700.
- Valerio J. 1997. Informe de Consultoría, Crecimiento y rendimiento (Documento Técnico 51). Proyecto BOLFOR, Santa Cruz, Bolivia. 34 p.
- Velarde R., J. C. 2002. Estudio de crecimiento y elaboración de volumen para *Pinus lawsoni* k y *Pinus oocarpa*. Diplomado: "aprovechamiento, conservación y restauración de los recursos forestales". Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. 72 p.
- Young R. A. 1991. Introducción a las ciencias forestales. Primera edición. Editorial Limusa, México, D.F. 634 p.
- Zamora C., E. M., O. G. Vázquez C., A. Pérez A., R. Cano F., A. Aparicio R. y E. Fernández P. 2007. Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb., en tres altitudes del Parque nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta veracruzana* 9(002): 33-37.
- Zepeda B., E. M. y M. C. P. Rivero B. 1984. Construcción de curvas de índice de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. *Ciencia forestal* 9:3-38.

APÉNDICE

Apéndice 1. Valores de los parámetros estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable diámetro.

MODELO	Ecuación	R ²	R ² _{Adj}	CME	F-calculada	PARAMETROS		
						B0	B1	B2
Schumacher	$Y = \exp^{(B_0 + B_1/E)}$	0.9510	0.9508	69.4513	7239.77	4.3135	-41.7788	
Chapman-Richards	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 \cdot E)}]^{B_2}$	0.9504	0.9501	70.4563	4754.45	56.1208	0.0276	1.9492
Weibull	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 (E^{B_2}))}]$	0.9500	0.9498	71.039	4713.42	54.6689	0.00296	1.4507
Korf	$Y = \exp^{(B_0 - B_1/E^{B_2})}$	0.9511	0.9509	69.47	4825.48	4.3943	31.5311	0.9023

R²=coeficiente de determinación, R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado, B0, B1, B2= parámetros y CME=cuadrado medio del error.

Apéndice 2. Valores de los parámetros estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable altura.

MODELO	Ecuación	R ²	R ² _{Adj}	CME	F-calculada	PARAMETROS		
						B0	B1	B2
Schumacher	$Y = \exp^{(B_0 + B_1/E)}$	0.9774	0.9774	6.7948	12852.5	3.6444	-33.8559	
Chapman-Richards	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 \cdot E)}]^{B_2}$	0.9793	0.9792	6.2467	9337.85	27.2371	0.045	2.7478
Weibull	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 (E^{B_2}))}]$	0.9794	0.9793	6.2089	9395.94	26.2832	0.0014	1.7751
Korf	$Y = \exp^{(B_0 - B_1/E^{B_2})}$	0.9778	0.9777	6.6869	8710.15	3.5168	66.3256	1.2334

R²=coeficiente de determinación, R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado, B0, B1, B2= parámetros y CME=cuadrado medio del error.

Apéndice 3. Valores de los parámetros estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable área basal (m²).

MODELO	Ecuación	R ²	R ² _{Adj}	CME	F-calculada	PARAMETROS		
						B0	B1	B2
Schumacher	$Y = \exp^{(B_0 + B_1/E)}$	0.8343	0.8339	0.00342	1878.24	-0.7492	-85.5355	
Chapman-Richards	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 \cdot E)}]^{B_2}$	0.8338	0.8329	0.00344	1245.38	0.4887	0.0098	1.8668
Weibull	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 (E^{B_2}))}]$	0.8332	0.8324	0.00345	1239.99	0.5341	0.000497	1.4907
Korf	$Y = \exp^{(B_0 - B_1/E^{B_2})}$	0.8354	0.8354	0.0034	1259.88	0.1722	25.278	0.5772

R²=coeficiente de determinación, R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado, B0, B1, B2= parámetros y CME=cuadrado medio del error.

Apéndice 4. Valores de los parámetros estadísticos de los modelos analizados para el conjunto de datos de la variable Volumen (m³).

MODELO	Ecuación	R ²	R ² _{Adj}	CME	F-calculada	PARAMETROS		
						B0	B1	B2
Schumacher	$Y = \exp^{(B_0 + B_1/E)}$	0.8144	0.8139	1.2508	1783.94	2.4656	-109.9	
Chapman-Richards	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 * E)}]^{B_2}$	0.8126	0.8119	1.2644	1173.89	6.1931	0.0225	4.0246
Weibull	$Y = B_0 [1 - \exp^{(-B_1 (E^{B_2}))}]$	0.8102	0.8095	1.2811	1155.1	6.1464	0.00006	2.1168
Korf	$Y = \exp^{(B_0 - (B_1/E^{B_2}))}$	0.8145	0.8139	1.252	1188.23	2.3307	154.8	1.1029

R²=coeficiente de determinación, R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado, B0, B1, B2= parámetros y CME=cuadrado medio del error.

Apéndice 5. Valores de los parámetros estadísticos para el modelo de Schumacher para la estimación de índice de sitio.

MODELO	Ecuación	R ²	R ² _{Adj}	CME	F-calculada	PARAMETROS	
						B0	B1
Schumacher	$Y = B_0 * \exp^{(-B_1/E)}$	0.9815	0.9813	5.5256	13972.2	39.6378	-34.6287

R²=coeficiente de determinación, R²_{Adj}=coeficiente de determinación ajustado, B0, B1, B2= parámetros y CME=cuadrado medio del error.