



**UNIVERSIDAD DEL MAR**

*Campus Puerto Escondido*

**SISTEMA DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO MADERABLE DE DOS  
ESPECIES ARBÓREAS EN UNA PLANTACIÓN FORESTAL EN LA  
COSTA DE OAXACA**

**T E S I S**

**QUE COMO REQUISITO  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO FORESTAL**

**PRESENTA**

**IGNACIO MEJIA CUEVAS**

**DIRECTOR DE TESIS**

**M. EN C. ROLANDO GALÁN LARREA**

**Puerto Escondido, Oaxaca, Febrero de 2013**



# Universidad del Mar

Puerto Escondido ~ Puerto Ángel ~ Huatulco  
O A X A C A

Puerto Escondido, Oax., diciembre de 2012

## ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

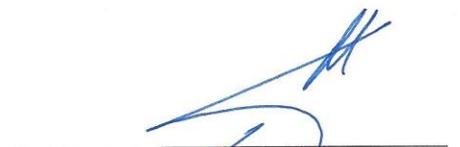
Después de realizar una revisión detallada de la Tesis titulada “**Sistema de crecimiento y rendimiento maderable de dos especies arbóreas en una plantación forestal en la Costa de Oaxaca**”, presentada por el pasante en Ingeniería Forestal **Ignacio Mejía Cuevas**, se considera que cumple con los requisitos y la calidad necesarios para ser defendida en el examen profesional.

### COMISIÓN REVISORA



---

**M. C. Rolando Galán Larrea**  
Universidad del Mar  
Director de tesis



---

**Dr. Héctor Manuel De los Santos Posadas**  
Colegio de Postgraduados  
Revisor



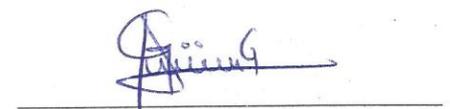
---

**Ing. Juan Morales Hernández**  
Colegio de Profesionales Forestales de Oaxaca  
Revisor



---

**M. C. Gricelda Valera Venegas**  
Universidad del Mar  
Revisor



---

**M. C. Celestino Sandoval García**  
Universidad del Mar  
Revisor

## **Dedicatoria**

Con mucho cariño, admiración y respeto, a mis padres Felix Mejia Cortés y Leonor Cuevas Zárate por haberme dado el tesoro mas valioso “la vida”, por haberme inculcado valores y principios para ser de mí una persona de bien y porque siempre me brindaron su apoyo incondicional a pesar de las adversidades.

A mis hermanos Roberto, Abel, Eva Luz, Guadalupe, Carmen y Martin porque siempre conté con su apoyo. Los quiero mucho a todos.

## Agradecimientos

- En primer lugar quiero agradecer a **Dios** por darme la vida y por permitirme cumplir mi sueño.
- A la **Universidad del Mar** por darme la oportunidad de cursar y culminar mi carrera profesional y por brindarme las herramientas necesarias para lograrlo.
- A mis padres y hermanos porque siempre conté con su apoyo moral y económico, por alentarme en los momentos más difíciles y por depositar toda su confianza en mí.
- A mis tíos y abuelos por todo el apoyo recibido y por alentarme a continuar siempre hacia adelante.
- A todos los demás familiares que de una u otra forma contribuyeron para que yo pudiera cursar la universidad.
- Al M.C. Rolando Galán Larrea, por dirigir este trabajo y por todos sus comentarios y aportaciones para mejorar la calidad del mismo. También por el apoyo económico durante las salidas a campo. Gracias por su confianza y paciencia.
- Al comité revisor: Dr. Héctor M. De los Santos Posadas, Ing. Juan Morales Hernández, M. Sc. Celestino Sandoval García y M. C. Gricelda Valera Venegas. Gracias por sus comentarios y observaciones que sin duda fueron de gran ayuda para mejorar la calidad del presente documento.
- Al C. José Luís López Pérez, propietario de la plantación de San José Chacalapa por permitir la realización de la presente investigación.
- A mis compañeros de generación: Areli, Brenda, Azucena, Mary, Roxana, Xochitl, Edgar y José Manuel, gracias por todos los momentos que compartimos durante mi estancia en la Universidad.

- A todos los profesores y profesoras que contribuyeron en mi formación profesional, en especial a la Dra. Juana Laura Rivera Nava por su amistad y sus buenos consejos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE CUADROS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	vii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
2.1. General.....	3
2.2. Específicos.....	3
III. HIPÓTESIS.....	3
IV. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
4.1. <i>Cedrela odorata</i> L. (Meliaceae).....	4
4.1.1. Descripción botánica y morfológica.....	4
4.1.2. Distribución.....	4
4.1.3. Usos.....	5
4.2. <i>Tabebuia donell-smithii</i> Rose (Bignoniaceae).....	6
4.2.1. Descripción botánica y morfológica.....	6
4.2.2. Distribución.....	6
4.2.3. Usos.....	6
4.3. Plantaciones forestales.....	7
4.3.1. Plantaciones de enriquecimiento de acahuales.....	7
4.3.2. Plantaciones forestales comerciales.....	9
4.3.2.1. Antecedentes de las plantaciones forestales comerciales.....	9
4.3.2.2. Importancia de las plantaciones forestales comerciales.....	13

4.3.2.3. Marco legal de las plantaciones forestales en México .....	16
4.4. Crecimiento y rendimiento maderable .....	16
4.4.1. Concepto de crecimiento y rendimiento.....	16
4.4.2. Importancia de calcular el crecimiento y rendimiento maderable .....	17
4.4.3. Modelos de crecimiento .....	18
4.4.4. Importancia de los modelos de crecimiento.....	19
4.4.5. Sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM).....	19
4.4.5.1. Funciones de altura dominante e índice de sitio .....	20
4.4.5.2. Funciones de área basal.....	21
4.4.5.3. Funciones de volumen.....	21
4.5. Métodos para calcular el rendimiento maderable .....	22
4.5.1. Modelos de rodales completos.....	22
4.5.2. Modelos por clases de tamaño .....	24
4.5.3. Modelos de árboles individuales .....	25
V. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
5.1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	28
5.2. Características de la plantación .....	28
5.2.1. Características climáticas .....	30
5.2.2. Características edáficas .....	30
5.3. Especies de estudio.....	30
5.4. Sitios de muestreo y toma de datos en campo.....	31
5.4.1. Variables a medir.....	31
5.5. Crecimiento y rendimiento maderable de <i>Cedrela odorata</i> L.y <i>Tabebuia donell-smithii</i> Rose.....	32

5.5.1. Crecimiento en altura .....	32
5.5.2. Crecimiento en área basal .....	33
5.5.3. Funciones de volumen por ha.....	34
5.6. Ajuste del sistema de crecimiento y rendimiento maderable.....	34
VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
6.1. Crecimiento en altura dominante .....	35
6.2. Crecimiento en área basal .....	37
6.3. Crecimiento en volumen .....	38
6.4. Ajuste del sistema de crecimiento y rendimiento maderable.....	39
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	43
7.1. Conclusiones .....	43
7.2. Recomendaciones.....	43
VIII. LITERATURA CITADA.....	45

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Proyectos aprobados cada año y superficie plantada a nivel nacional .....	10
Cuadro 2. Situación de las plantaciones forestales comerciales en Oaxaca durante el periodo 1997 a 2009 .....	11
Cuadro 3. Situación de las plantaciones forestales comerciales por región, en el estado de Oaxaca .....	12
Cuadro 4. Principales especies plantadas en el estado de Oaxaca. Cuadro 5. Resumen del análisis de regresión realizado con datos de altura-edad en <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose para conocer el nivel de ajuste del modelo utilizado .....	13
Cuadro 5. Resumen del análisis de regresión realizado con datos de altura-edad en <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose para conocer el nivel de ajuste del modelo utilizado.....	35
Cuadro 6. Estadísticas del ajuste para los modelos de altura dominante, área basal y volumen para cedro y primavera en San José Chacalapa, Pochutla* .....	39
Cuadro 7. Edad, altura dominante, área basal, volumen, incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) para tres índices de sitio (IS) en una plantación comercial de <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donnell-smithii</i> Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación geográfica de la plantación: El Carnizuelo, El Pénjamo, Arroyo Rico y El Riego en San José Chacalapa, Pochutla Oaxaca .....	29
Figura 2. Curvas anamórficas de ÍS para <i>Cedrela odorata</i> L. y <i>Tabebuia donell-smithii</i> Rose, a una edad base de 10 años, en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca .....	36
Figura 3. Crecimiento en área basal por índice de sitio, a una edad base de 10 años.....	37
Figura 4. Crecimiento en volumen total por índice de sitio, considerando una edad base de 10 años.....	38
Figura 5. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio, a una edad base de 10 años.....	40

## RESUMEN

El Cedro rojo (*Cedrela odorata* L.) y la Primavera (*Tabebuia donell-smithii* Rose), son especies tropicales de alto valor comercial, que se utilizan para la fabricación de muebles, chapas, contrachapados, molduras y vigas principalmente.

El presente estudio tiene como finalidad desarrollar un sistema de crecimiento y rendimiento para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose empleando información dasométrica derivada de cinco remediciones en sitios permanentes de muestreo en una plantación de enriquecimiento de acahual en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Se estimó la productividad de la plantación mediante el uso de curvas anamórficas de índice de sitio basado en el modelo de Schumacher. Además se realizó el ajuste simultáneo de los modelos de altura dominante, área basal y volumen para conocer el ajuste de los datos, bajo la técnica de regresión aparentemente no correlacionada con el paquete estadístico SAS. Para la calidad de sitio más pobre (IS=15) el turno técnico en volumen se estima a los 24 años, mientras que para los sitios de mejor calidad, tanto para cedro rojo como primavera se tienen turnos técnicos mayores de 24 años.

A la misma edad, el crecimiento en altura dominante de primavera se localiza en mejores sitios (IS = 25) cuando se le compara con el cedro rojo (IS = 15).

**Palabras clave:** índice de sitio, modelos de crecimiento, Chacalapa.

## ABSTRACT

*Spanish cedar* (*Cedrela odorata* L.) and Primavera (*Tabebuia donell-smithii* Rose), are tropical timber species of high commercial value, frequently used for furniture, veneer, plywood, moldings and beams.

The present study aims to develop a growth and yield timber system for *Cedrela odorata* L. and *Tabebuia donell-smithii* Rose, based on dasometric information obtained from permanent plots with five re-measurements at anacahuallenrichment plantation in San Jose Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Productivity was estimated using anamorphic Schumacher based site index curves. The growth and yield system based on dominant height, basal area and total volume is simultaneously fitted with seemingly unrelated regression using SAS software. For the poorest site indexquality (SI = 15) the estimated rotation that maximizes volume is 24 years, while for higher quality sites, both Spanish cedar and Primavera remain growing past 24 years of age suggesting longer rotations.

To the same age, the growth in dominant height of primavera is located in better sites (IS = 25) when is compared with *Spanish cedar* (IS = 15).

Keywords: site index, growth models, Chacalapa.

## I. INTRODUCCIÓN

Los modelos de crecimiento y rendimiento son herramientas que facilitan la toma de decisiones, ya que permiten predecir los volúmenes de madera y en consecuencia optimizar la cosecha del bosque, además, se pueden usar como herramienta para controlar rendimientos (Valdez-Lazalde y Lynch, 2000).

La información de crecimiento generalmente es usada para construir modelos de predicción y simulación del rendimiento del arbolado bajo diferentes condiciones de desarrollo. Estos modelos en el largo plazo, resultan ser la herramienta más importante del administrador de la plantación para identificar las mejores políticas de manejo (Torres y Magaña, 2005). Conocer el crecimiento y rendimiento maderable permite conocer la productividad de un sitio forestal (Gómez-Tejero *et al.*, 2009).

A pesar de la importancia del uso de los modelos de rendimiento para facilitar el proceso de toma de decisiones en el manejo forestal, países como México, desarrollan el manejo de la mayoría de sus especies forestales sin tener conocimiento acerca de las tasas de crecimiento o rendimiento maderable esperados a diferentes edades (Valdez-Lazalde y Lynch, 2000).

Las especies tropicales poseen una gran importancia tanto ecológica como económica; sin embargo, en México y particularmente en Oaxaca no existe suficiente información acerca del crecimiento y rendimiento maderable tanto de bosques naturales como de plantaciones. En cambio, existe mayor información para especies de clima templado, principalmente para las del género pino (Galán *et al.*, 2008).

Los bosques tropicales tienen la característica de ser los más altamente productivos desde el punto de vista biológico (Whitmore, 1984). Sin embargo, son pocos los estudios sobre crecimiento y rendimiento maderable que se han hecho para especies tropicales, lo que refleja que las prácticas de manejo utilizadas no tengan un sustento científico cuantitativo.

Para las especies arbóreas tropicales y subtropicales, el desarrollo de modelos que permitan predecir su crecimiento y rendimiento, es incipiente (Domínguez, 1996).

La mayoría de los trabajos sobre crecimiento y rendimiento maderable para especies tropicales comprenden de dos a tres mediciones como los trabajos hechos por Galán *et al.* (2008) con *Cedrela odorata* y *Tabebuia donell-smithii*, Téllez *et al.* (2008) con *Eucalyptus grandis* y Gómez-Tejero *et al.* (2009) con *Eucalyptus grandis* y *E. urophylla*. Es por ello que se pretende contribuir al conocimiento acerca del crecimiento y rendimiento maderable, con datos de cinco mediciones para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose establecidas en una plantación forestal en la localidad de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.

Para dichas especies, el presente trabajo es pionero en México ya que se cuenta con información de cinco mediciones en parcelas permanentes y debe servir como referencia para estudios posteriores acerca del crecimiento y rendimiento maderable de las mismas u otras especies tropicales.

## **II. OBJETIVOS**

### **2.1. General**

Desarrollar un sistema de crecimiento y rendimiento maderable para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose, así como estimar y proyectar el crecimiento en área basal y volumen maderable de una plantación forestal comercial, en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca;

### **2.2. Específicos**

- 1) Determinar el crecimiento y rendimiento maderable para cedro y primavera en una plantación forestal comercial establecida en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca, con datos de cinco mediciones (2005, 2006, 2008, 2009 y 2010).
- 2) Estimar y proyectar los volúmenes maderables de cedro y primavera en una plantación de San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.
- 3) Generar información técnica sobre el crecimiento actual y futuro tanto de cedro como de primavera.

## **III. HIPÓTESIS**

- No existen diferencias significativas en la predicción de volumen total, área basal y altura dominante entre las especies *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose, por lo tanto, el sistema de crecimiento y rendimiento maderable a generar puede ser utilizado indistintamente para ambas especies.

## IV. REVISIÓN DE LITERATURA

### 4.1. *Cedrela odorata* L. (Meliaceae)

#### 4.1.1. Descripción botánica y morfológica

Es comúnmente conocida como cedro rojo en toda su área de distribución. Es un árbol que alcanza 35 m de altura y hasta 1.7 m de diámetro a la altura del pecho (d.a.p.), su tronco es recto y en ocasiones forma pequeños contrafuertes. Su copa es redonda y densa. Las hojas son dispuestas en espiral, paripinnadas o imparipinnadas, de 15 a 50 cm de largo incluyendo el pecíolo, compuestas por 10 a 22 folíolos opuestos o alternos, además poseen un penetrante olor a ajo cuando se estrujan. Los árboles de esta especie tiran las hojas cuando han madurado totalmente los frutos de la temporada anterior y antes de florecer (Pennington y Sarukhán, 2005). La madera es aromática, tiene una albura rojo-blanquiza y un duramen de rojo a rojo marrón. Es muy resistente a la intemperie y de alta durabilidad natural, tanto en tierra como en agua. Sus características técnicas corresponden a las de la caoba, aunque es más blanda y quebradiza (Lamprecht, 1990).

#### 4.1.2. Distribución

El cedro rojo está ampliamente distribuido en Latinoamérica, pero en áreas discontinuas. Se encuentra aproximadamente desde los 24 °N hasta los 10 °S, abarcando México, Centroamérica, Las Antillas, el norte de Sudamérica, hasta alcanzar Perú y Brasil, se desarrolla en altitudes de hasta 1200 m. Se puede encontrar de manera natural en los suelos bien drenados, en piedra caliza y tolera una larga temporada de secas pero no prospera en las áreas con una precipitación de más de 3000 mm o en los sitios con suelos densos o anegados (Lamprecht, 1990).

Niembro (1986) señala que el cedro rojo se encuentra principalmente en ecosistemas húmedos, específicamente en el bosque tropical perennifolio, el bosque tropical caducifolio, el bosque tropical subcaducifolio y el bosque mesófilo de montaña.

Es una especie muy abundante en la vegetación secundaria de diversas selvas. Se encuentra en la vertiente del Golfo desde el sur de Tamaulipas, sureste de San Luis Potosí y la Huasteca hasta el norte de Chiapas y la selva Lacandona, la depresión central de Chiapas y en la península de Yucatán. En la vertiente del Pacífico desde Sinaloa hasta Jalisco, Colima y en la costa de Chiapas. Se desarrolla en suelos de origen volcánico o calizo con buen drenaje (Pennington y Sarukhán, 2005).

#### **4.1.3. Usos**

Después de la caoba es la especie tropical maderable más importante en la industria forestal de México. Su madera se utiliza para obtener vigas, tablas y chapas, así como para fabricar diversos artículos torneados, cajas de puros y para hacer esculturas. El uso más indicado para esta especie, por el bello acabado de su madera, es la fabricación de chapas y contrachapados para exportación (Pennington y Sarukhán, 2005).

La madera de cedro rojo es considerada la mejor para la construcción de canoas y lanchas deportivas. Además se emplea en la industria de chapas y tableros terciados, en construcciones interiores y exteriores, para muebles, productos torneados, instrumentos musicales y utensilios de uso diario (Lamprecht, 1990).

Es importante mencionar que actualmente el uso de madera de cedro rojo se encuentra restringido a partir de 2010, debido a que su estatus cambió a especie sujeta a protección especial, según la NOM-059-SEMARNAT-2010 (D.O.F., 2010).

## **4.2. *Tabebuia donell-smithii* Rose (Bignoniaceae)**

### **4.2.1. Descripción botánica y morfológica**

Es mejor conocida como primavera en toda su área de distribución. Es un árbol que alcanza hasta 30 m de altura y d.a.p. de hasta 70 cm, con el tronco ligeramente acanalado, ramas ascendentes y copa alargada. Las hojas son decusadas digitado compuestas, de 20 a 70 cm de largo incluyendo el pecíolo, compuestas de siete folíolos, ocasionalmente cinco. Las flores son de color amarillo y se presentan en panículas terminales, piramidales, con ramas cimosas de 15 a 35 cm de largo. El fruto es una cápsula de 25 a 50 cm de largo. Los árboles de esta especie pierden las hojas a fines de marzo, época en que florecen y las repone a principios de mayo (Pennington y Sarukhán, 2005).

### **4.2.2. Distribución**

Esta especie se distribuye en la vertiente del Pacífico desde el norte de Sinaloa hasta Guerrero; en la porción sur de la costa de Chiapas formando parte de selvas medianas subcaducifolias; y en la vertiente del Golfo, en el sur de Veracruz y la zona de los Chimalapas en selvas altas perennifolias. Se desarrolla en suelos de origen volcánico y metamórfico o sedimentario (Pennington y Sarukhán, 2005).

### **4.2.3. Usos**

Su madera, de color claro, es muy apreciada en la industria para la fabricación de muebles (Pennington y Sarukhán, 2005). Francis (1989) señala que los usos principales de la madera de primavera son para muebles, chapa decorativa, molduras, vigas y leña.

### **4.3. Plantaciones forestales**

La FAO (2006) define a las plantaciones forestales como “bosques de especies introducidas y en algunos casos de especies nativas, establecidas mediante plantación o siembra, con pocas especies, espaciamiento regular y de edad uniforme”.

Trujillo (s/f) define una plantación forestal como el establecimiento de árboles que conforman una masa boscosa y que tiene un diseño, tamaño y especies definidas para cumplir objetivos específicos como plantación productiva, fuente energética, protección de zonas agrícolas, protección de espejos de agua, corrección de problemas de erosión, plantaciones silvopastoriles, entre otras.

Rojas (1983) define una plantación forestal como el cultivo de árboles forestales técnicamente planeado para la obtención de productos y beneficios forestales de la mejor calidad, con el mínimo costo y en el menor tiempo posible.

A pesar de las grandes ventajas que proporcionan las plantaciones forestales en comparación con los bosques naturales, en México, son pocas las plantaciones que se han establecido. Por lo anterior, es necesario evaluar las pocas plantaciones existentes en el país, con el fin de tener un mayor conocimiento sobre el comportamiento y evolución de las mismas (Arteaga-Martínez, 2000).

#### **4.3.1. Plantaciones de enriquecimiento de acahuales**

Se utiliza el término “acahual” para referirse a las comunidades secundarias en distintas etapas de regeneración del bosque tropical, que suceden al abandono de un terreno cultivado por cierto número de años (Sarukhán, 1964). Con el paso del tiempo, el acahual puede llegar a ser estructural y florísticamente muy semejante al bosque original, aunque en ocasiones puede llegar a formar una vegetación totalmente diferente (Romero *et al.*, 2000).

El reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable publicado en el Diario Oficial de la Federación en 2005, define al acahual como la vegetación secundaria nativa que surge de manera espontánea en terrenos preferentemente forestales en zonas tropicales que estuvieron bajo uso agrícola o pecuario, y que además cuenta con las siguientes particularidades:

- En selvas altas o medianas, cuenta con menos de 15 árboles por hectárea con un diámetro normal mayor a 25 cm, o bien, con un área basal menor a cuatro metros cuadrados por hectárea.
- En selvas bajas, debe contar con menos de 15 árboles por hectárea con un diámetro normal mayor a 10 cm, o bien, con un área basal menor a dos metros cuadrados por hectárea.

El enriquecimiento de acahuales es una práctica de manejo agroforestal que consiste en introducir especies maderables o no maderables a un terreno forestal con el fin de incrementar su valor (Morales *et al.*, 2006).

Ejemplos de este tipo de plantación son los publicados por Morales *et al.* (2006) como “Propuesta de Reforestación y Enriquecimiento de la microcuenca el Polev, Tenosique, Tabasco”.

Otro caso exitoso es el que se llevó a cabo en la región de la Chinantla Baja, en el municipio de San Juan Lalana, en el estado de Oaxaca, con especies forestales maderables y no maderables (Edouard, s/f).

También se reporta una plantación de enriquecimiento de acahuales con especies de alto valor comercial en el trabajo “Sistema de crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca (Galán *et al.*, 2008).

### **4.3.2. Plantaciones forestales comerciales**

La Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable la define como el establecimiento, cultivo y manejo de vegetación forestal en terrenos temporalmente forestales o preferentemente forestales, cuyo objetivo principal es la producción de materias primas forestales destinadas a su industrialización y/o comercialización (D.O.F. 2003).

Musalem (2006), menciona que las plantaciones forestales comerciales son aquellas destinadas a la producción de bienes para la sociedad.

#### **4.3.2.1. Antecedentes de las plantaciones forestales comerciales**

A fines del 2006, en el mundo existían 205 millones de hectáreas de plantaciones forestales comerciales. En países como Sudáfrica, Argentina, Brasil, Chile, Indonesia y Malasia, las plantaciones comerciales aportan entre el 70 y el 100% del volumen de madera industrial (UACH, 2007).

Se considera que en México para el año 2006 existía una superficie cercana a los 11 millones de hectáreas factibles para establecer plantaciones forestales comerciales. Las principales especies arbóreas susceptibles de plantar en esa superficie son: teca, melina, caoba, cedro y pinos, las cuales se establecen de acuerdo a las condiciones de suelo y clima para asegurar su crecimiento y supervivencia (UACH, 2007). Sin embargo, estas cifras derivan de estudios de gran visión en donde la falta de información y de escalas apropiadas puede llevar a sobreestimaciones (Pérez, 2010).

En un estudio hecho por la Universidad Autónoma Chapingo, se menciona que en México de 1997 a 2007 el Gobierno Federal financió cerca de 6,500 proyectos de plantaciones forestales comerciales, lo que significa una superficie apoyada de más de 500 mil hectáreas. Sin embargo

existe un gran rezago en el avance real de las plantaciones, ya que para 2007 sólo se había plantado el 21.3% (Cuadro 1) (UACH, 2007).

Según datos de la CONAFOR, desde el inicio del Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales al 2011, se asignaron recursos a cerca de 9,800 proyectos para el establecimiento de 758 mil ha, de las cuales sólo se han plantado 183 mil. Lo anterior se debe a diversos problemas entre los que destacan la falta de liquidez de los beneficiarios, la falta de asistencia técnica, la escasez de planta de calidad u otros incentivos para el beneficiario, así como de la carencia de fuentes alternativas de financiamiento y aseguramiento de las inversiones (CONAFOR, 2011).

**Cuadro 1. Proyectos aprobados cada año y superficie plantada a nivel nacional.**

Año	No. de proyectos	Superficie total (ha)	Superficie plantada (%)
1997	11	33,447	41.6
1999	13	9,985	0.8
2000	34	17,124	30.1
2001	191	39,725	24.3
2002	509	96,749	21.9
2003	519	68,462	17.5
2004	472	66,214	18.7
2005	492	53,826	6.9
2006	988	26,751	31.8
2007	3,508	131,162	19.7
Total	6,737	543,445	21.3

Fuente: Evaluación de los Apoyos para Plantaciones Forestales Comerciales, UACH, 2007.

Para el estado de Oaxaca, durante el periodo que va de 1997 a 2009 se apoyó, a través de la CONAFOR, el establecimiento de más de 58,000 hectáreas de plantaciones comerciales distribuidas en más de 400 proyectos. Sin embargo, sólo se ha plantado alrededor del 13.5 % de la superficie comprometida, lo que equivale a 7830 hectáreas (Cuadro 2). Lo mismo sucede en la región de la Costa, donde se reporta un 4.5% de avance en el establecimiento de las plantaciones (Cuadro 3) (CONAFOR, 2010).

**Cuadro 2. Situación de las plantaciones forestales comerciales en Oaxaca durante el periodo 1997 a 2009.**

Año	No. de Proyectos	Superficie comprometida (ha)	Superficie plantada (ha)
1997	1	20,624	1,653
2000	4	2,625	50
2001	7	684	112
2002	25	4,572	502
2003	79	6,906	1,546
2004	36	6,549	1,053
2005	26	1,648	391
2006	26	2,469	841
2007	92	4,250	841
2008	65	5,250	293
2009	67	3,239	250
Total	428	55,577	7,532

Fuente: Comisión Nacional Forestal. Gerencia Regional V. Coordinación General de Producción y productividad. Plantaciones Forestales Comerciales. 2010.

Entre las especies utilizadas en el estado de Oaxaca dentro del programa de Plantaciones Forestales Comerciales, destacan el eucalipto, el cedro rojo, la caoba y el género pino, las cuales suman un total de 5,821 hectáreas (Cuadro 4) (CONAFOR, 2010).

Las plantaciones forestales de las zonas tropicales proporcionan gran parte de la oferta de madera a nivel mundial. Sin embargo, la demanda creciente de productos maderables indica que en el futuro se requerirá no sólo mayor superficie de plantaciones sino plantaciones con un rendimiento mayor (Laclau *et al.*,2009).

**Cuadro 3. Situación de las plantaciones forestales comerciales por región, en el estado de Oaxaca.**

Región	No. de Proyectos	Superficie Comprometida (ha)	Superficie plantada (ha)	% avance
Cañada	7	1,037	99	9.55
Costa	130	6,968	317	4.55
Istmo	38	3,107	143	4.60
Mixteca	6	451	41	9.09
Papaloapan	195	39,994	5,008	12.52
Sierra Norte	6	818	420	51.34
Sierra Sur	41	6,382	1,273	19.95
Valles				
Centrales	5	116	36	31.03
Total	428	58,873	7,337.33	17.83

Fuente: Comisión Nacional Forestal. Gerencia Regional V. Coordinación General de Producción y productividad. Plantaciones Forestales Comerciales. 2010.

#### **Cuadro 4. Principales especies plantadas en el estado de Oaxaca.**

Espece	Superficie (ha)	Espece	Superficie (ha)
Cedro rojo y caoba	1,490	Pinus	1,420
Palmas y pita	185	Piñon	70
Eucalyptus	2,911	Macuil	187
Teca	416	Bambu	12
Melina	88	Primavera	188
Cedro rosado	35	Otras	197

Fuente: Comisión Nacional Forestal. Gerencia Regional V. Coordinación General de Producción y productividad. Plantaciones Forestales Comerciales. 2010.

#### **4.3.2.2. Importancia de las plantaciones forestales comerciales**

Zárate (2010), menciona que las plantaciones forestales comerciales tienen como principal objetivo la producción de bienes para la sociedad y disminuir las presiones que la misma sociedad ejerce sobre los recursos naturales, principalmente sobre el suelo y agua.

En México, industrias y organizaciones relacionadas a la actividad forestal han establecido o planean establecer plantaciones forestales comerciales para satisfacer parte de sus necesidades de materias primas (Martínez-Ruiz *et al.*, 2006). El establecimiento de plantaciones forestales comerciales y la aplicación de técnicas para su manejo en México se han ido desarrollando e intensificando a través del tiempo, con la intención de mejorar la producción y representar una alternativa para abastecer e impulsar a la industria forestal de materias primas provenientes de terrenos con una mayor aptitud forestal, y al mismo tiempo, disminuir la presión

por el uso y aprovechamiento de los bosques naturales (Bustillos-Herrera *et al.*, 2007; Hernández, 2010).

Este tipo de plantaciones buscan hacer productivas las áreas que ya no son utilizadas en la agricultura y la ganadería a fin de ampliar la frontera silvícola, para que los productores y dueños de estos terrenos aprovechen sus recursos naturales de forma sustentable, y que al mismo tiempo les permita ser un mecanismo para combatir la pobreza y recuperar la masa forestal (UACH, 2007).

Musálem (2006), señala la necesidad de establecer plantaciones forestales comerciales en nuestro país, debido principalmente a los siguientes factores:

- La destrucción del recurso forestal.
- El crecimiento de la demanda de madera.
- Los problemas de la regeneración natural.
- La lejanía y poca accesibilidad de los bosques naturales a centros de consumo.
- El deterioro ambiental.

De acuerdo con la CONAFOR (2001), las plantaciones forestales comerciales ofrecen diversas ventajas para los inversionistas. Entre las que más sobresalen se encuentran las siguientes:

- Diversificación del portafolio de inversiones.
- Tasa de retorno competitiva a largo plazo.
- Predictibilidad del ingreso si el manejo está bajo control y el mercado para la madera producida está asegurado.
- Las previsiones de la demanda-oferta a nivel internacional son positivas.

- La competitividad de la madera de las plantaciones es generalmente mejor que la del bosque natural (homogeneidad del producto, acceso y condiciones de extracción más fáciles, etc.).
- Imagen positiva por la inversión "verde".

Desde 1997, el Gobierno Federal ofrece subsidios para el desarrollo de plantaciones forestales comerciales en el país, con el objeto de impulsar la producción de insumos para abastecer a la industria forestal bajo precios competitivos (CONAFOR, 2009).

Para ello se creó el Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN), que actualmente se encuentra dentro del programa PROÁRBOL, y que se planteó como objetivo para el año 2025 apoyar el establecimiento de 875 mil hectáreas de plantaciones forestales comerciales, a fin de reducir las importaciones de productos forestales y de crear alternativas de desarrollo sustentable y de diversificación productiva (SEMARNAT, 2005).

Las zonas tropicales de México son consideradas de gran potencial para el establecimiento y manejo de plantaciones forestales comerciales, ya que considerando su posición geográfica, reciben grandes cantidades de energía solar, lo que junto con las condiciones favorables de suelo y clima que las caracterizan, permiten un crecimiento adecuado de las especies arbóreas. Además, su cercanía con los países consumidores representa una ventaja para la comercialización de los productos obtenidos de ellas (Martínez *et al.*, 2006).

Las plantaciones forestales comerciales permiten mejorar los diversos componentes del ecosistema donde éstas son establecidas, ejemplo de ello son las siguientes (Villa-Salas, 2002; Musálem, 2006):

- Mejora las estructuras física y química del suelo.

- Mejora la fertilidad del suelo como resultado de una mayor incorporación de materia orgánica.
- Disminuye el efecto de la erosión hídrica y eólica.
- Disminuye de manera directa la presión que existe sobre los bosques y selvas naturales, ya que al producirse materia prima adicional con este tipo de plantaciones, la oferta en el mercado aumenta.
- Aumenta la capacidad del suelo para infiltrar agua.
- Incrementan la producción de oxígeno y la captura de carbono.

#### **4.3.2.3. Marco legal de las plantaciones forestales en México**

En México lo constituyen la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable en los artículos 85 al 96; los artículos 45 al 52 del Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable; artículo quinto, inciso Ñ, fracción I y II del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental; la Norma Oficial Mexicana 059 debido a la inclusión del cedro rojo como especie sujeta a protección especial, y la Ley de Vida Silvestre (DOF, 2000; DOF, 2003; DOF, 2005; DOF, 2010)

### **4.4. Crecimiento y rendimiento maderable**

#### **4.4.1. Concepto de crecimiento y rendimiento**

Los árboles experimentan procesos de crecimiento que permiten el incremento dimensional de los mismos. Este crecimiento se produce en zonas especializadas que reciben el nombre de meristemos (Williams, 2001). Este proceso tiene lugar simultánea e independientemente en sus diferentes partes, como resultado de la actividad de los meristemos

primarios, que provocan el crecimiento longitudinal, así como de los meristemas secundarios, que dan lugar al crecimiento en grosor o en diámetro, al producir nueva madera hacia el interior y corteza hacia el exterior (Diéguez *et al.*,2003).

El crecimiento se refiere al aumento en tamaño (altura, diámetro, área basal y volumen) de una población o individuo, ya sea en biomasa, en número o de cualquier otra variable de interés en un intervalo de tiempo determinado, siendo el crecimiento en altura y diámetro las variables que se miden con mayor frecuencia, para determinar el crecimiento en volumen. Además, es considerado un proceso dinámico y su medición requiere de un monitoreo permanente. Por otro lado, el rendimiento se refiere al crecimiento en volumen de madera de un árbol, el cual puede ser cosechable o explotable al final de un periodo de tiempo determinado (Klepac, 1983; Vanclay, 1991; Torres y Magaña, 2005).

#### **4.4.2. Importancia de calcular el crecimiento y rendimiento maderable**

El estudio del crecimiento y de la producción presente y futura de los árboles y rodales forestales es básico y fundamental para la planificación y administración forestal (Moscovich, 2004). Usando la información del crecimiento, expresada en modelos de predicción y simulación del rendimiento, es como el administrador de la plantación puede identificar las mejores políticas de manejo, sea cual sea el objetivo de la plantación (Torres y Magaña, 2005).

Cuando no se cuenta con la estimación del incremento y rendimiento de las masas forestales, se puede decir que el manejo forestal llevado a cabo es de eficiencia desconocida, ya que se carece de las bases para juzgar alternativas dasonómicas viables (Valdez-Lazalde y Lynch, 2000).

Al evaluar el crecimiento de una plantación y definir su dinámica de desarrollo, así como su probable rendimiento a una edad o fecha determinada, es posible identificar estrategias de

manejo para optimizar tasas de crecimiento que satisfagan los objetivos de producción previamente fijados, actividades de cosecha, así como planificar actividades de protección y cultivo (Torres y Magaña, 2005).

#### **4.4.3. Modelos de crecimiento**

Un modelo es una abstracción o una representación simplificada de algunos aspectos de la realidad. Mientras que un modelo forestal de crecimiento es una abstracción de la dinámica de una masa forestal, abarcando crecimiento, rendimiento, mortalidad y otros cambios en la composición y estructura de la masa forestal que se expresan como una serie de ecuaciones matemáticas, bajo una amplia variedad de condiciones. Dichos modelos se basan en simples relaciones funcionales entre la magnitud del crecimiento y los factores o variables que explican ese crecimiento. La diferencia entre los modelos de crecimiento y rendimiento es evidente en rodales de la misma edad (coetáneos), pero menos evidente en rodales incoetáneos. En rodales coetáneos, una ecuación de crecimiento predice el crecimiento en diámetro, área basal o volumen en unidades por año, mientras que una ecuación de rendimiento predice el diámetro, área basal del rodal o volumen total de producción alcanzado a una edad determinada (Vanclay, 1991; 1994).

Los modelos de crecimiento son también considerados modelos matemáticos ya que son una de las herramientas analíticas más utilizadas para la generación de conocimiento en el estudio del crecimiento y reproducción de masas forestales sujetas a un régimen de cultivo. Estos modelos facilitan la estimación del rendimiento en rodales homogéneos en varios regímenes de manejo, pero la estimación del estado del bosque, también debe involucrar el espacio y distribución temporal de los rendimientos, por lo que la estimación del rendimiento puede

apoyarse en las técnicas de programación matemática para encontrar la ruta óptima, que maximice el rendimiento sustentable y flujo declinante de la corta (Klepac, 1983).

Existe una diversidad de modelos en cuanto a estructura, componentes, construcción y propósitos de utilización, esto debido a que el crecimiento y la reproducción son procesos complejos (Mendoza, 1983; citado por Arteaga-Martínez, 2000).

#### **4.4.4. Importancia de los modelos de crecimiento**

La determinación de la edad de cosecha y regímenes silvícolas de manejo óptimos son algunas de las decisiones más importantes que enfrentan quienes administran los recursos forestales al planificar el proceso de producción forestal primario. Los modelos de crecimiento y rendimiento forestal son herramientas que facilitan la toma de decisiones en el manejo forestal, por al menos tres razones (Valdez-Lazalde y Lynch, 2000):

- 1) Permiten predecir rendimientos y en consecuencia optimizar la cosecha del bosque.
- 2) Permiten evaluar regímenes o tratamientos de manejo alternativos.
- 3) Pueden usarse como una herramienta para controlar rendimientos.

El desarrollo de modelos de crecimiento implica la exploración de datos para proporcionar nuevas perspectivas de la dinámica forestal y revelar huecos en el conocimiento presente. Una vez implementado, el modelo puede ser usado para estudiar la dinámica forestal, para explorar opciones de silvicultura y de manejo, además para prever futuras cosechas (García, 1988; Vanclay, 1995).

#### **4.4.5. Sistema de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM)**

Un SCRM es un conjunto de modelos que explican de manera cuantitativa el complejo fenómeno del crecimiento forestal, reflejado en los cambios de la magnitud de variables como altura, diámetro, área basal, número de árboles y volumen. Los componentes del SCRM son las

funciones de altura dominante e índice de sitio, área basal, diámetro, volumen y número de árboles, que en conjunto permiten conocer la productividad de los sitios forestales en términos de crecimiento y rendimiento maderable a través del tiempo (Santiago, 2009).

Los componentes de un SCRM, generalmente representados por el área basal, mortalidad y volumen maderable, están correlacionados con la altura dominante y sus proyecciones son afectadas por su patrón de crecimiento (Gómez-Tejero *et al.*, 2009).

#### **4.4.5.1. Funciones de altura dominante e índice de sitio**

La calidad de sitio se define como el potencial de producción de madera de un sitio para una determinada especie, donde a mejor calidad, mayor producción (Clutter *et al.*, 1983). El índice de sitio (IS) se define como la altura promedio de los árboles dominantes y codominantes (100 árboles ha<sup>-1</sup>) a una edad base (Torres y Magaña, 2005) considerando: 1) la altura mayor en un rodal monoespecífico y coetáneo es poco afectada por la densidad, 2) el crecimiento en altura mayor del rodal seguirá un patrón determinado y 3) la altura mayor tiene buena correlación con la producción volumétrica (Clutter *et al.*, 1983).

Clutter *et al.* (1983), consideran que existen tres métodos de construcción de funciones de índice de sitio:

- Método de la Curva Guía
- Método de la Diferencia Algebraica
- Método de la Predicción de Parámetros

El método de la curva guía usa información proveniente de sitios de muestreo temporal y es utilizada para generar funciones de índice de sitio anamórficas, aunque también se pueden generar funciones polimórficas.

El método de la diferencia algebraica utiliza información proveniente de sitios de muestreo permanente o bien datos de altura-edad derivados de análisis troncales. Los modelos usualmente utilizados son el de Schumacher, el modelo de Richards y el Weibull.

El método de la predicción de parámetros es usado para generar funciones polimórficas de índice de sitio, con la característica de generar curvas que se interceptan. Este procedimiento ha sido poco utilizado y por mucho ha resultado inferior al procedimiento de la diferencia algebraica (Torres y Magaña, 2005)

El modelo de Schumacher (1939) posee características deseables para describir adecuadamente los patrones de crecimiento en altura dominante observados en masas forestales, utilizando solo dos parámetros:  $a$  que representa la altura máxima (asíntota) y  $b$ , la tasa de cambio de crecimiento en altura con la edad (Jerez-Rico *et al.*, 2011).

#### **4.4.5.2. Funciones de área basal**

El área basal permite conocer y evaluar el efecto que tienen los diferentes niveles de densidad en el rendimiento maderable, y como consecuencia, definir algunos esquemas silviculturales apropiados a cada condición de bosque (Santiago, 2009). El área basal se calcula a través de un promedio de las áreas basales en los sitios de muestreo y es considerada una medida de densidad que involucra tanto el número de individuos como el número de sitios, por lo tanto, es quizá la variable más utilizada para modelar el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado, tanto a nivel poblacional como individual (Torres y Magaña, 2005).

#### **4.4.5.3. Funciones de volumen**

A partir de la evaluación de las existencias volumétricas en una plantación, es posible conocer la cantidad de madera disponible y con ello poder planear las actividades de cosecha que se llevarán a cabo en una plantación (Torres y Magaña, 2005).

El volumen de la plantación se puede evaluar de dos formas: una a través de la suma de los volúmenes de los árboles individuales y la otra a través de la estimación de variables promedio como área basal y la altura promedio. En el primer caso es necesario evaluar los volúmenes de los árboles individuales y posteriormente estimar el volumen poblacional. En el segundo caso, será necesario tener una estimación apropiada de las variables promedio que servirán para evaluar el volumen poblacional (Torres y Magaña, 2005).

#### **4.5. Métodos para calcular el rendimiento maderable**

Dado que existen muchas estrategias de modelaje del crecimiento y rendimiento maderable, es regularmente aceptado que este tipo de modelos se clasifican en: modelos de rodales completos, modelos de clases de tamaño y modelos de árboles individuales (Vanclay, 1991).

Por un lado, los modelos de rodales completos proporcionan directamente resultados por unidad de superficie, mientras que con los otros tipos de modelos, éstos se obtienen agrupando los resultados de las clases diamétricas o de los árboles individuales (Crecente-Campo, 2008).

##### **4.5.1. Modelos de rodales completos**

Este tipo de modelos son los más antiguos que se conocen para hacer una estimación del crecimiento y han sido los de mayor uso en la estimación del rendimiento en plantaciones, tanto por su sencillez como por lo económico de su construcción. En la generación de este tipo de modelos se han utilizado diferentes funciones de distribución de probabilidades para caracterizar las distribuciones diamétricas de los rodales forestales. Estos modelos se caracterizan porque la solución de las ecuaciones que comprende el sistema, proporciona la estimación del volumen por

unidad de área y la predicción puede ser para estimar el rendimiento actual, el cual no considera la densidad de la proyección futura o rendimiento futuro (Klepac, 1983; Torres y Magaña, 2005).

Los modelos de crecimiento y rendimiento a nivel del rodal usan parámetros promedio como son: el área basal, volumen y número de árboles por hectárea (Vanclay, 1994).

La evaluación del crecimiento de plantaciones forestales con una sola medición puede utilizarse sólo para comparar las tasas de crecimiento con algún tratamiento en particular, o bien para conocer la tasa promedio de crecimiento de la plantación (Torres y Magaña, 2005).

Existen dos tipos de modelos de crecimiento de rodales completos que se pueden construir con el tipo de información obtenida. Estos son los modelos de predicción explícita y los modelos de distribuciones diamétricas o también conocidos como modelos de predicción implícita. El primero proporciona características promedio por estratos de plantación, mientras que el segundo proporciona estimaciones más específicas como número de individuos por categoría, así como algunos atributos adicionales como volumen comercial y mortalidad por categoría, entre otras variables. La predicción implícita requiere el uso de uno o varios modelos que predicen explícitamente un conjunto de variables, a partir de las cuales es posible recuperar la condición futura del rodal (Torres y Magaña, 2005).

Los modelos de predicción explícita han sido ampliamente usados por su sencillez y precisión, requiriendo información básica como diámetro y altura para su construcción. Tienen la desventaja de proporcionar información muy general de la plantación de interés; sin embargo, algunas modificaciones y ampliaciones de estos modelos pueden usarse para proporcionar información más detallada de la misma (Torres y Magaña, 2005).

Los modelos de predicción explícita se clasifican en dos categorías: modelos de predicción a tiempo actual y modelos de predicción a tiempo futuro (Clutter *et al.*, 1983). Los primeros, son determinísticos y predicen la condición actual de variables como área basal,

volumen y número de individuos; los segundos, predicen condiciones futuras de las mismas variables a partir de condiciones actuales y considerando el intervalo de tiempo. En los modelos de predicción a tiempo actual es muy común que el modelaje del crecimiento se realice mediante relaciones entre el crecimiento total y variables relacionadas que identifiquen el estado de la plantación, tales como densidad, sitio, mezcla y edad. Por ello generalmente se usan simples relaciones funcionales de la forma (Torres y Magaña, 2005):

$$V = f(S, E, \delta, \mu)$$

Donde  $V$  representa el volumen,  $S$  representa una medida de la calidad de sitio,  $E$  la edad de la plantación,  $\delta$  es una medida de densidad y  $\mu$  representa una medida de la mezcla de especies.

El modelo clásico para realizar estimaciones explícitas a tiempo actual es el modelo de Schumacher (1939), que tiene la siguiente forma:

$$\log(V) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 \log(AB) + \frac{\beta_3}{E}$$

Donde  $V$  representa el volumen,  $AB$  representa el área basal,  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  y  $\beta_3$  son los parámetros a estimar del modelo.

#### **4.5.2. Modelos por clases de tamaño**

La evaluación del crecimiento por clases de tamaño pretende estimar el crecimiento en alguna variable de interés a partir de la evaluación del crecimiento de cada categoría en la que se pueda subdividir la población, siendo las categorías diamétricas las que más se han utilizado. Este procedimiento es el más usado para estimar el crecimiento, tanto en poblaciones naturales como en plantaciones comerciales (Vanclay, 1991).

La evaluación del crecimiento por categorías puede realizarse de una forma estática o de una forma dinámica. La evaluación estática solo pretende conocer el crecimiento promedio de una población específica y en alguna variable de interés, a partir de la evaluación del crecimiento de todos los segmentos de la población agrupados en categorías, siendo el volumen la variable de mayor relevancia. La evaluación dinámica busca modelar, en la medida de lo posible, la dinámica de crecimiento. Los modelos usados para este tipo de proyecciones varían desde modelos muy simples a modelos tan sofisticados como los modelos de proyección de árboles individuales. Las categorías que se pueden usar para realizar la proyección no necesariamente deben ser categorías de diámetro, también pueden usarse las categorías de altura o ambas; es común, sobre todo en la estimación del crecimiento y rendimiento de plantaciones con especies tropicales. La información procedente de sitios permanentes de muestreo, información de inventario e información de análisis troncales, ha dado buenos resultados (Torres y Magaña, 2005).

Los modelos por clases de tamaños aportan más detalles para simular varias clases dentro del rodal, un ejemplo de éstos es la proyección de tablas a nivel rodal (Klepac, 1983).

#### **4.5.3. Modelos de árboles individuales**

Los modelos de crecimiento de árboles individuales proporcionan directamente el incremento de cada árbol. La estimación del incremento bruto por unidad de área se obtiene al sumar los volúmenes individuales y multiplicarlo por el factor apropiado que considera diversas variables que afectan el crecimiento de los árboles como la competencia y la localidad. La mayoría de estos modelos se han desarrollado para plantaciones, pero rara vez son utilizados en la práctica para predecir el crecimiento y rendimiento. La idea fundamental de este tipo de modelos es que se puede proyectar el crecimiento en las variables de interés para cada árbol

individual. Tal proyección depende de factores exógenos, densidad, sitio y mezcla de especies (Torres y Magaña, 2005).

Los modelos para arboles individuales se subdividen en: a) modelos independientes de la distancia y b) modelos dependientes de la distancia. Los primeros no requieren de ninguna información de la distribución espacial de los árboles, mientras que los segundos incluyen o precisan una medición espacial de la competencia. Ésta se expresa normalmente en función de la distancia entre un árbol determinado y sus vecinos, así como del tamaño de dichos vecinos (Vanclay, 1994).

La evaluación del crecimiento en árboles individuales establece como supuesto básico que existen árboles representativos de una condición de arbolado, o de toda la plantación que pueden asemejar el crecimiento de toda la masa. La evaluación del crecimiento puede ser de forma estática o dinámica. La evaluación estática se realiza cuando se desea tener una estimación muy gruesa del rendimiento promedio de una plantación y no se cuenta con parcelas de diferentes edades y en diferentes condiciones de crecimiento. Por su parte, la evaluación dinámica permite estimar la tendencia del crecimiento de la plantación. El procedimiento puede ser a través de análisis troncales de arbolado de tamaño promedio o bien con la medición directa de árboles en diferentes condiciones de crecimiento (Torres y Magaña, 2005).

Algunos de los modelos usados para predecir el crecimiento y rendimiento de rodales irregulares y/o mezclados frecuentemente requieren la inclusión de una medida de competencia interarbórea dentro del rodal. Tales medidas se conocen como “índices de competencia”, e indican el nivel de competencia por recursos o estrés de un árbol individual en relación a sus vecinos (Torres y Magaña, 2005).

En la modelación a nivel árbol, medir la longitud de copa, su anchura o el radio de copa viva, puede aportar información valiosa para estimar la competencia que un árbol ha sufrido en el

pasado. Estas variables también pueden considerarse medidas de la vitalidad de un individuo y pueden ser importantes a la hora de predecir el crecimiento y la mortalidad (Crecente-Campo, 2008).

## V. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Ubicación geográfica del área de estudio

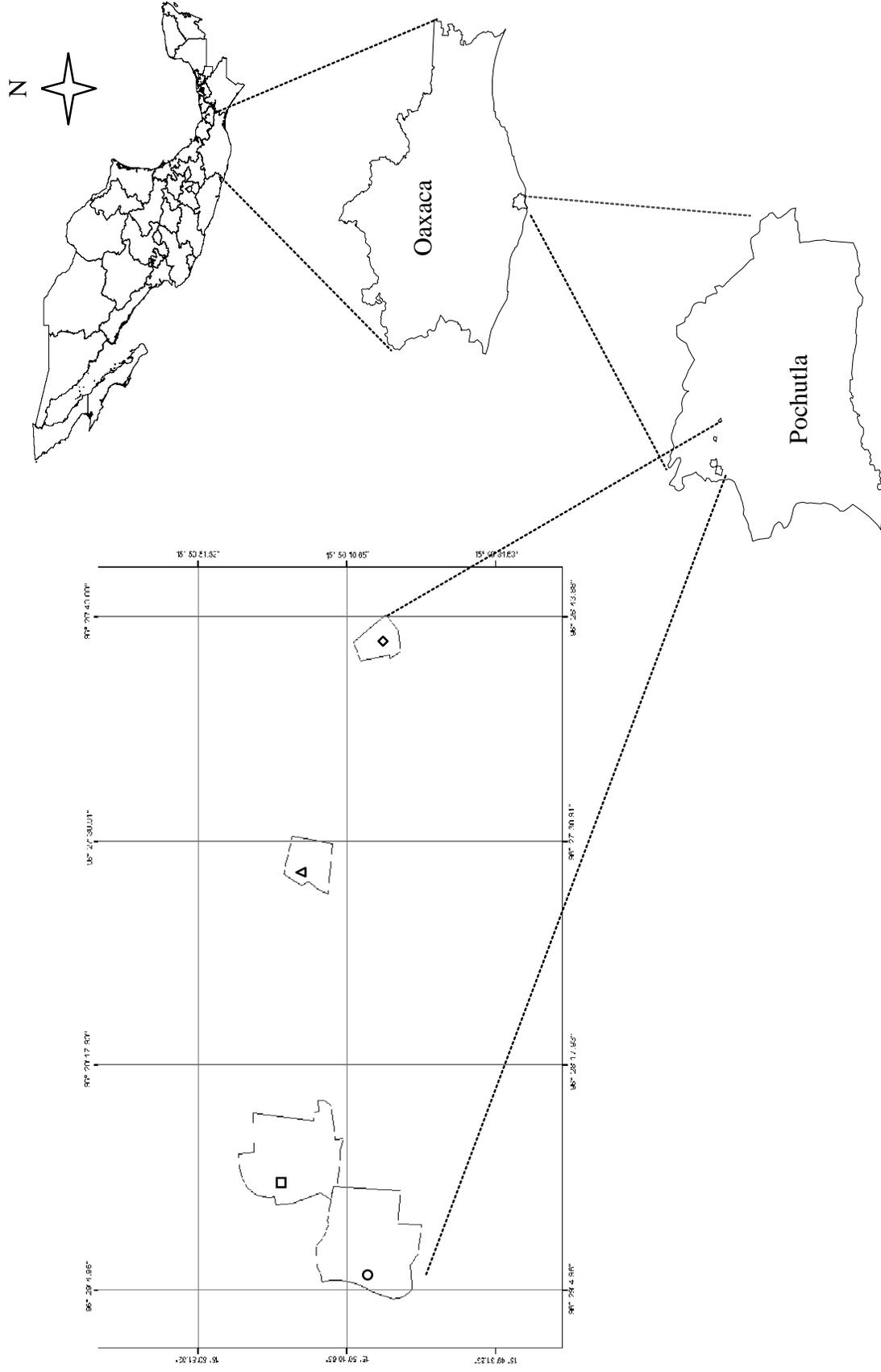
La plantación forestal donde se llevó a cabo el estudio se localiza al noroeste de la localidad de San José Chacalapa, en el municipio de San Pedro Pochutla, Oaxaca, en los predios denominados El Pénjamo, El Carnizuelo, Arroyo Rico y El Riego (Figura 1).

### 5.2. Características de la plantación

A partir de 1997, en los predios antes mencionados, se establecieron una serie de plantaciones de enriquecimiento de acahual con especies arbóreas de alto valor comercial. A lo largo de este tiempo se ha plantado más superficie y se ha hecho reposición en aquellas donde se ha registrado cierto grado de mortalidad, por lo que el arbolado presente en dicha plantación no tiene la misma edad. La plantación cuenta actualmente con una superficie aproximada de 200 hectáreas.

Las especies que han sido plantadas son cedro rojo (*Cedrela odorata* L.), primavera (*Tabebuia donell-smithii* Rose), macuil (*Tabebuia rosea* (Bertol.) DC.), caobilla (*Swietenia humillis* Zucc.), caoba (*Swietenia macrophylla* King) y pino del caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* (Sénecl.) Barr. y Golf.), siendo las dos primeras las de mayor superficie plantada.

A dicha plantación se le han aplicado labores de cultivo en periodos de cinco años, es decir, a la edad aproximada de cinco, diez y quince años. El primero es muy leve y consiste únicamente en limpiezas de franjas para evitar la insolación y mortandad, el segundo es más amplio ya que se elimina el 50% de matorral y el último es más intenso y consiste en la depuración de las demás especies para dar mayor espacio a las especies de interés, dado que el cedro rojo a esta edad consolida su corteza definitiva y puede soportar la insolación para este tipo de ecosistemas tanto de selva baja caducifolia como de selva mediana caducifolia (Morales, 2012).



**Figura 1. Ubicación geográfica de la plantación: “El Pénjamo” (O), “Arroyo Rico” (Δ), “El Carnizuelo” (□) y “El Riego” (◇); en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca (tomado de Galán *et al.*, 2008).**

### **5.2.1. Características climáticas**

De acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (1988), el clima del área de estudio corresponde al grupo de climas cálidos subhúmedos con lluvias en verano  $Aw_1$ , con una precipitación media anual de 934.7 mm y una temperatura media anual de 26 °C (García, 1988).

### **5.2.2. Características edáficas**

De acuerdo a cartografía del INEGI, el tipo de suelo que predomina en el área de estudio corresponde a un regosol éutrico (Re) característicos por ser de color claro y de profundidad moderada o alta; aunque también se observan suelos feozem háplico ricos en materia orgánica, que presentan un color oscuro y carecen de un horizonte cálcico. La topografía del terreno donde se localiza la plantación la constituyen pequeños lomeríos, con pendientes que van de 5 a 40% (INEGI, 1995).

## **5.3. Especies de estudio**

En el presente estudio se consideran las especies de cedro rojo y primavera, por tratarse de especies de alto valor comercial, son las más plantadas y además son especies que han sido estudiadas previamente en un trabajo realizado en el 2005 por Galán *et al.* (2008). Con este trabajo se pretende dar seguimiento a su crecimiento y rendimiento ya que para la región no existe información suficiente que permita estimar de manera confiable el crecimiento y rendimiento maderable de dichas especies y así poder tomar decisiones acertadas respecto a su manejo.

#### **5.4. Sitios de muestreo y toma de datos en campo**

Para determinar el crecimiento y rendimiento maderable se utilizaron datos dasométricos obtenidos de 14 sitios de muestreo de 400 m<sup>2</sup> cada uno (10 de cedro y 4 de primavera) establecidos de acuerdo a la superficie plantada por cada especie. Dichos sitios permanentes fueron establecidos en 2005 de manera selectiva, de tal forma que cubrieran individuos de diferentes edades. Se marcó todo el arbolado presente dentro de los mismos de manera consecutiva para facilitar su control y posterior localización; al mismo tiempo se llevó a cabo la primera medición de las variables dasométricas. Durante el 2006, 2008, 2009 y 2010 se llevó a cabo la segunda, tercera, cuarta y quinta remediación respectivamente.

##### **5.4.1. Variables a medir**

Las variables que se midieron directamente de los árboles presentes en los sitios de muestreo fueron: altura total y diámetro normal a la altura del pecho (1.30 m). La altura total se midió con el uso de un clinómetro marca Suunto Tandem, mientras que el diámetro normal se midió con una cinta diamétrica de la marca Forestry Suppliers Inc.

Para conocer la edad de los árboles en los diferentes sitios y predios, se consultó el registro de la plantación.

Los datos de diámetro normal y altura total fueron capturados y ordenados en una hoja de cálculo (Excel), donde se calculó el área basal por árbol, por sitio y posteriormente por hectárea. Además, con los datos de área basal y altura de los arboles, se calculó el volumen maderable de la plantación en metros cúbicos por hectárea.

## 5.5. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* L.y *Tabebuia donell-smithii*

Rose

### 5.5.1. Crecimiento en altura

Se le conoce como Índice de Sitio (IS) a la altura dominante evaluada a una edad de referencia, y es el método más popular y práctico para la evaluación de la productividad forestal (Clutter *et al.*, 1983; Zepeda y Rivero, 1984).

Para la estimación del crecimiento en altura se utilizó el modelo de Schumacher (1939) por su sencillez para modelar altura dominante y porque presentó un buen ajuste para predecir y explicar el crecimiento de *Cedrela odorata* y *Tabebuia donell-smithii* en el trabajo hecho por Galán *et al.* (2008) con datos de dos remediciones anuales, tomando en cuenta el valor de Pseudo-R<sup>2</sup>, así como los valores de suma de cuadrados del error (SCE) y cuadrado medio del error (CME).

Es importante señalar que se utilizó el modelo de Schumacher (1939) ya que también se pretende conocer su comportamiento con datos de cinco mediciones y poder ver su diferencia en relación al trabajo de Galán *et al.* (2008).

La expresión matemática de este modelo tiene la siguiente forma:

$$HD = a_0 \times \exp\left(-\frac{a_1}{E}\right) \quad (1)$$

Donde *HD* es la altura dominante en metros; *E* es la edad en años; *a*<sub>0</sub> y *a*<sub>1</sub> son los parámetros a estimar.

Para la estimación del índice de sitio, se utilizó el siguiente modelo de diferencia algebraica que incluye altura dominante.

$$HD_2 = HD_1 \times \frac{\exp\left(\frac{-a_1}{E_2}\right)}{\exp\left(\frac{-a_1}{E_1}\right)} \quad (2)$$

Donde:  $HD_2$  es la altura dominante a la edad de proyección,  $HD_1$  es la altura dominante inicial;  $E_1$  es la edad inicial,  $E_2$  es la edad de proyección;  $a_1$  es el parámetro a estimar.

Esta expresión se convierte a un sistema de calificación de índice de sitio al remplazar  $HD_2$  por el  $IS$  y  $E_2$  por la edad base. A su vez  $HD_1$  pasa a ser la altura observada a la  $E_1$ .

### 5.5.2. Crecimiento en área basal

El área basal (AB) se define como el área de la sección transversal de un árbol medida a 1.3 m de altura. El AB es considerada una medida directa de la densidad que involucra tanto el número de individuos como el tamaño de los mismos, y es quizá, la variable más utilizada para modelar el efecto de la densidad en el crecimiento del arbolado, tanto a nivel poblacional como individual (Torres y Magaña, 2005). Se calcula a través de un promedio de las áreas basales en los sitios de muestreo.

El área basal para un sitio de muestreo se estima como:

$$AB = \sum_i ab_i = 0.7854 \sum_i D_i^2$$

Donde  $ab_i$  es el área basal del  $i$ -ésimo árbol en el sitio y  $D_i$  es el diámetro a la altura del pecho del mismo árbol en metros.

Para la estimación del área basal se utilizó el siguiente modelo que incluye a la altura dominante:

$$AB = b_0 \times HD^{b_1} \times \exp\left(\frac{b_2 \times HD}{E}\right) \quad (3)$$

Donde  $AB$  es el área basal,  $E$  es la edad;  $b_0$ ,  $b_1$  y  $b_2$  son los parámetros a estimar del modelo, las demás variables ya fueron definidas.

Al incluir la altura dominante, este modelo se vuelve sensible al índice de sitio.

### 5.5.3. Funciones de volumen por ha

Para la estimación y proyección del crecimiento en volumen se utilizó el siguiente modelo de estimación de volumen total que incluye a la altura dominante y el área basal:

$$Vol = c_0 \times AB^{c_1} \times HD^{c_2} \quad (4)$$

Donde:  $Vol$  es el volumen en  $m^3ha^{-1}$ ;  $c_0$ ,  $c_1$  y  $c_2$  son los parámetros a estimar. Las demás variables ya fueron definidas.

## 5.6. Ajuste del sistema de crecimiento y rendimiento maderable

Basado en el trabajo de Galán *et al.* (2008), el ajuste de los modelos se realizó con la técnica de regresión aparentemente no correlacionada (SUR, por sus siglas en inglés), utilizando el paquete estadístico SAS (SAS, 2001).

Una vez definidas las curvas de índice de sitio para altura dominante, se ajustaron simultáneamente los modelos de altura dominante, área basal y de volumen para conocer el ajuste de los datos.

## VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Crecimiento en altura dominante

Con el ajuste del modelo de Schumacher se generaron familias de curvas anamórficas de índice de sitio (IS) para 15, 20 y 25 m, a una edad base de 10 años (Figura 2).

Los valores de ajuste del modelo de Schumacher para los datos de cinco remediciones se presentan en el cuadro 5.

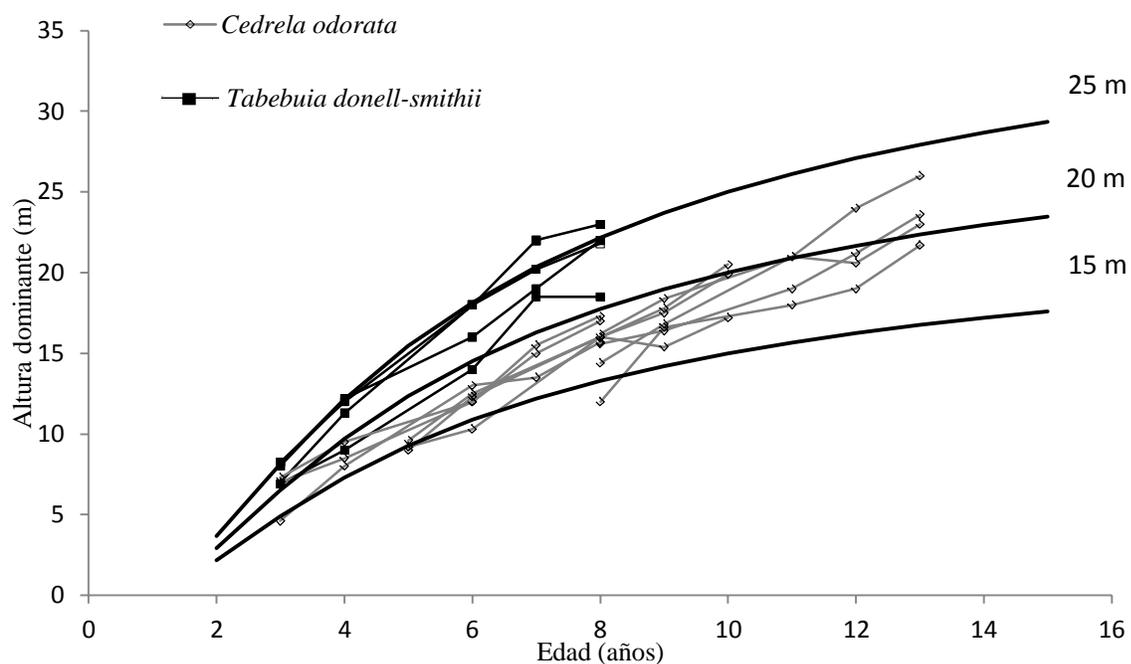
**Cuadro 5. Resumen del análisis de regresión realizado con datos de altura-edad en *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose para conocer el nivel de ajuste del modelo utilizado.**

Modelo	R <sup>2</sup>	SCE	CME	Parámetros	Valores estimados de $a_i$	Error estándar	Prob>T
1	0.7722	396.3	5.8275	$a_0$	31.5171	1.5529	< .0001
				$a_1$	4.8093	0.3656	< .0001

\* Simbología: R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; SCE = Suma de Cuadrados del Error; CME = Cuadrado Medio del Error.

Durante el análisis preliminar de los datos no se encontraron diferencias estadísticas entre las especies, por lo que se usó un solo modelo (la misma curva promedio representa a ambas especies). Es posible ver que el crecimiento de primavera (IS = 25) se localiza en mejores sitios cuando se le compara con el cedro rojo (IS = 15). Aumentar la cantidad de sitios para primavera permitirá definitivamente separar ambas curvas siendo que cada especie tiene su curva. Sin embargo, vale la pena notar como los sitios de cedro rojo de mayor edad mantienen un ritmo de

crecimiento que parece alcanzar al crecimiento de primavera. Muy probablemente el hecho que las plantaciones de *Tabebuia donell-smithii* presenten mejor índice de sitio que *Cedrela odorata*, se deba a que el suelo donde fue plantada esta especie, es un suelo más fértil, ya que está asociado al cultivo de café y a la selva mediana subcaducifolia. Lo anterior también debido a que durante los primeros años de haber sido establecidas requieren de cierta cantidad de sombra.



**Figura 2. Curvas anamórficas de ÍS para *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose, a una edad base de 10 años, en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.**

Las curvas muestran que las especies estudiadas aun están en la fase de crecimiento en altura, ya que presentan un comportamiento ascendente. Sin embargo, difiere a lo reportado por Galán *et al.* (2008), en donde las curvas de crecimiento en altura se observa un comportamiento

exponencial, mientras que en el presente estudio las curvas muestran un crecimiento exponencial durante los primeros años y un crecimiento lento en los últimos.

## 6.2. Crecimiento en área basal

El crecimiento en área basal presenta un comportamiento casi exponencial para los tres índices de sitio, siendo más marcado en el de mayor calidad (IS = 25). Esto indica que el arbolado tanto de cedro como de primavera continúa creciendo en diámetro, debido a lo joven de la plantación (Figura 3).

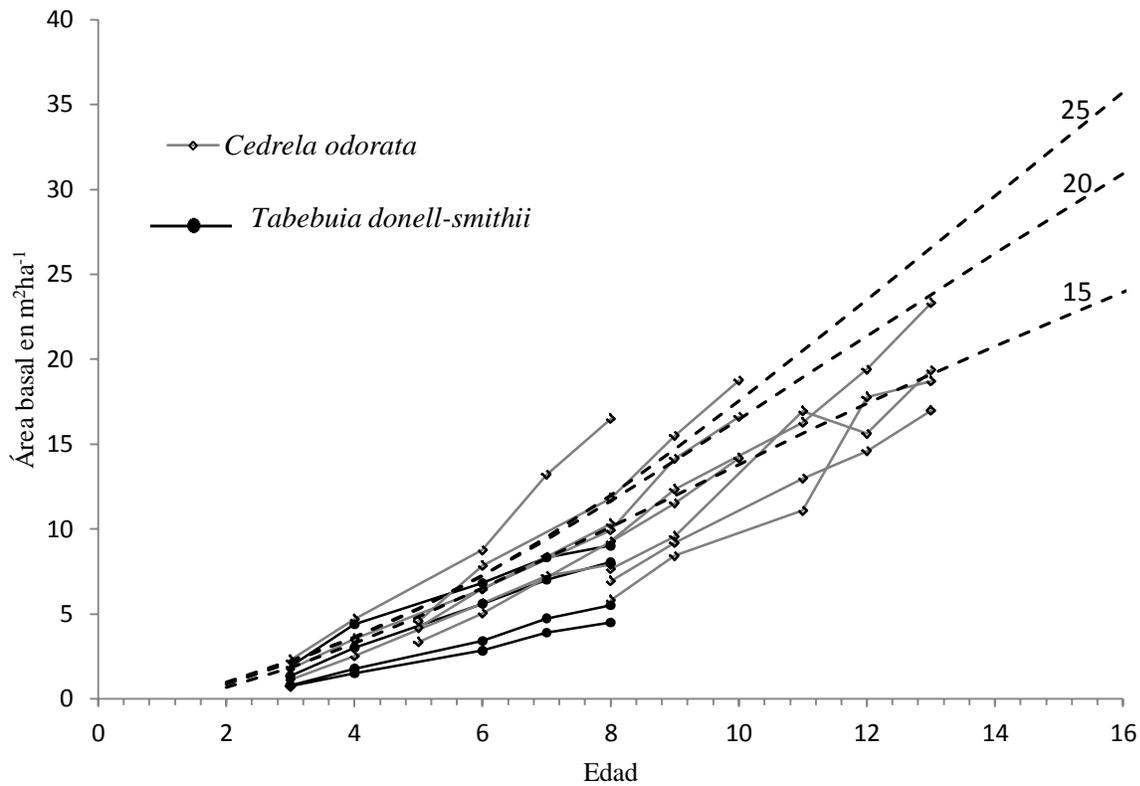


Figura 3. Crecimiento en área basal por índice de sitio, a una edad base de 10 años.

Las curvas de IS muestran una fase de lento crecimiento hasta los ocho años y a partir de esa edad se acelera considerablemente. Esto indica que a dicha edad, ambas especies redujeron su crecimiento en altura y se incrementó su crecimiento en diámetro.

### 6.3. Crecimiento en volumen

La figura 4 muestra el crecimiento en volumen de las especies estudiadas para los tres índices de sitio (15, 20 y 25 m) a diferentes edades, considerando una edad base de 10 años.

Al igual que la gráfica de crecimiento en área basal, el crecimiento en volumen también sigue un comportamiento ascendente. Lo anterior indica que tanto cedro como primavera continúan en su etapa de crecimiento. Se observa que en sitios de edades tempranas, el cedro rojo presenta un crecimiento en volumen ligeramente superior que el de primavera.

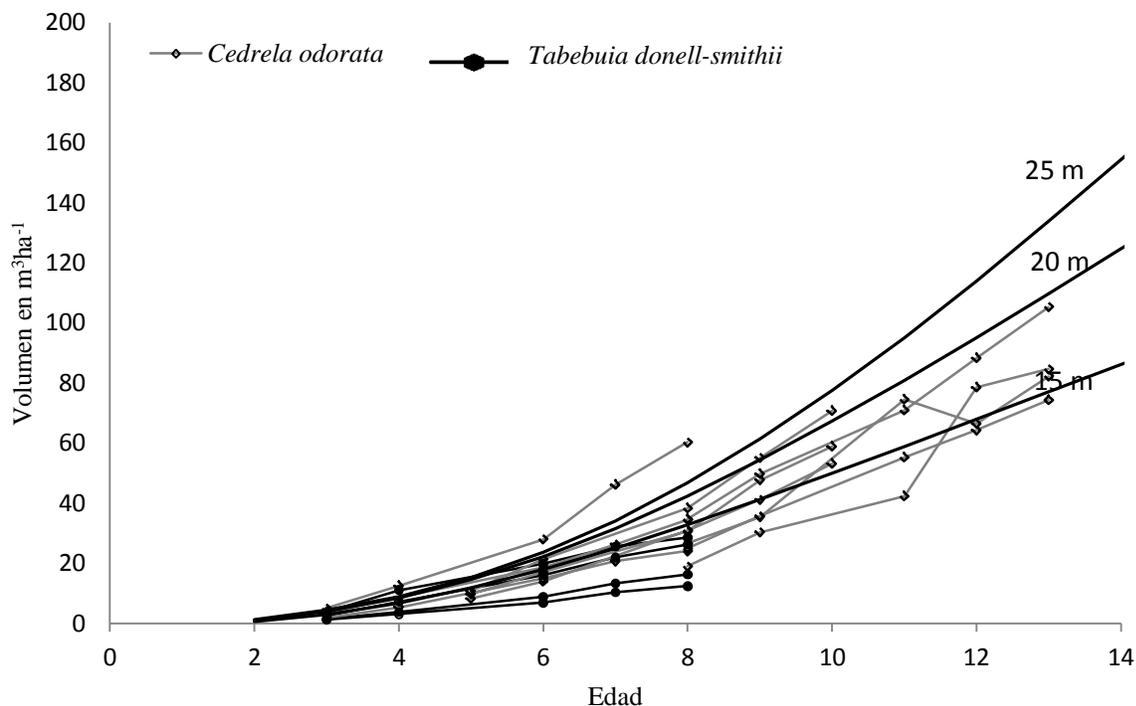


Figura 4. Crecimiento en volumen total por índice de sitio, considerando una edad base de 10 años.

#### 6.4. Ajuste del sistema de crecimiento y rendimiento maderable

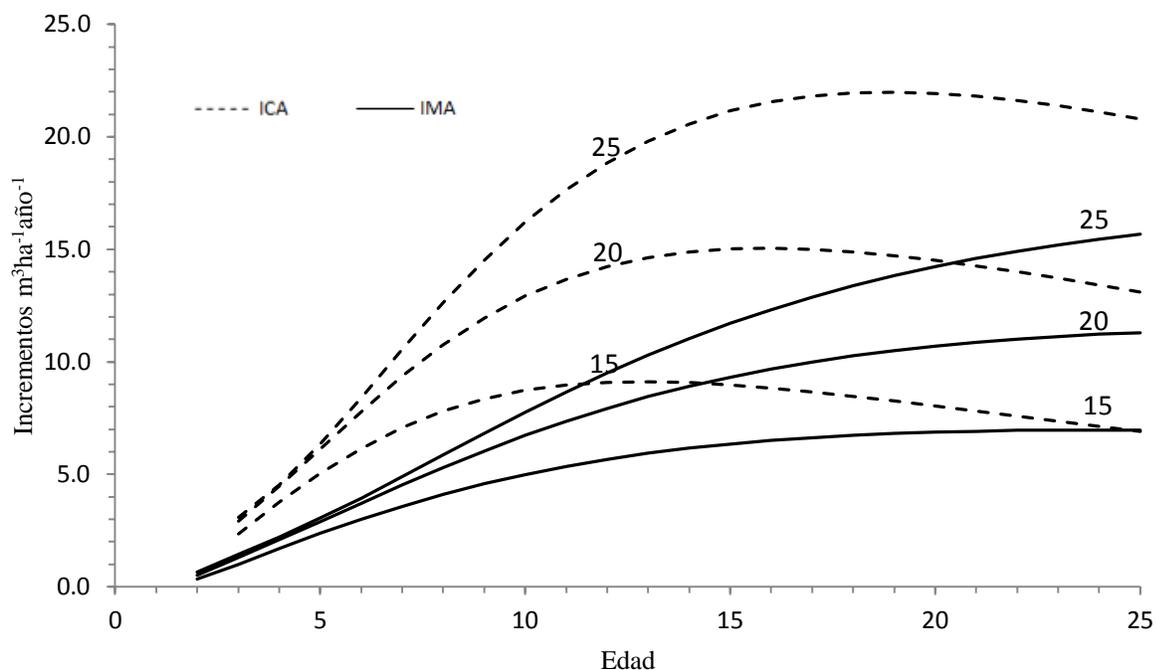
Al ajustar simultáneamente los modelos de altura dominante, área basal y volumen, bajo la técnica SUR, se obtuvieron los valores estadísticos de los estimadores que se muestran en el cuadro 6.

**Cuadro 6. Estadísticas del ajuste para los modelos de altura dominante, área basal y volumen para cedro y primavera en San José Chacalapa, Pochutla\*.**

Ecuación	R <sup>2</sup> adj	SCE	CME	Par	VE	Error estándar	Pr > t
HD	0.7722	396.3	5.8275	$a_0$	31.5171	1.5529	< .0001
				$a_1$	4.8093	0.3656	< .0001
AB	0.8400	338.2	5.0474	$b_0$	0.3438	0.1396	0.0163
				$b_1$	1.7169	0.1267	< .0001
				$b_3$	-0.6375	0.0793	< .0001
VOL	0.9852	654.5	9.7686	$c_0$	0.8966	0.1333	< .0001
				$c_1$	1.2426	0.0364	< .0001
				$c_2$	0.2795	0.0691	0.0001

\* Simbología: R<sup>2</sup> adj = Coeficiente de determinación ajustado, SCE = Suma de cuadrados del error, CME = Cuadrado medio del error, Par = Parámetros, VE = Valores estimados de los parámetros.

Las curvas de crecimiento en área basal y en volumen siguen un comportamiento ascendente, lo mismo sucede con las curvas de incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) (Figura 5).



**Figura 5. Curvas del incremento medio anual (IMA) e incremento corriente anual (ICA) por índice de sitio, a una edad base de 10 años.**

Se observa que las curvas de IMA e ICA para los las calidades de sitio de 20 y 25 m, aún no se cruzan, lo que significa que aún no llegan a su turno técnico, contrario a lo que ocurre en la calidad de sitio de 15m.

En sitios de menor calidad el turno técnico llega a la edad de 24 años aproximadamente, lo que nos lleva a tomar decisiones sobre las técnicas silvícolas a aplicar en sitios con estas características.

Sandoval (2010), en un estudio realizado en San José Chacalapa y Santiago La Galera, encontró que la curva del ICA e IMA en altura y diámetro para *Cedrela odorata* se cruzan a los ocho y nueve años respectivamente, mientras que para *Tabebuia donell-smithii* el turno técnico en diámetro llega a los 8.5 años, sin embargo no estimó incrementos en volumen. Lo anterior

probablemente se debe a que solo tomó en cuenta datos de dos mediciones anuales y el tamaño de los sitios fue más pequeño (250 m<sup>2</sup>).

Por tratarse de una plantación joven, las especies estudiadas aun se encuentran en una fase acelerada de crecimiento, tanto en área basal como en volumen, sin embargo en la gráfica se puede observar que las curvas de incremento medio anual están llegando a su punto de culminación.

En el Cuadro 7, se presenta la producción maderable de las especies estudiadas en una plantación de enriquecimiento de acahual a densidades iniciales diferentes entre los sitios de muestreo. Se presentan las alturas dominantes, el crecimiento en área basal y volumen por hectárea, así como el incremento corriente anual y el incremento medio anual por hectárea por año a diferentes índices de sitio.

**Cuadro 7. Edad, altura dominante, área basal, volumen, incremento corriente anual (ICA) e incremento medio anual (IMA) para tres índices de sitio (IS) en una plantación comercial de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca.**

Edad (años)	Alt. dominante por IS			Área basal por IS			Volumen por IS			ICA por IS			IMA por IS		
	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25	15	20	25
2	2.2	2.9	3.7	0.7	0.9	1.0	0.7	1.0	1.3				0.3	0.5	0.6
3	4.9	6.5	8.1	1.9	2.1	2.2	3.0	3.9	4.4				2.3	2.9	3.1
4	7.3	9.7	12.2	3.3	3.6	3.6	6.8	8.4	8.9				3.8	4.5	4.5
5	9.3	12.4	15.5	4.8	5.3	5.3	11.8	14.5	15.2				5.0	6.1	6.3
6	10.9	14.5	18.1	6.5	7.3	7.2	18.0	22.3	23.6				6.1	7.8	8.4
7	12.2	16.3	20.3	8.3	9.4	9.5	25.0	31.6	34.2				7.1	9.4	10.6
8	13.3	17.7	22.2	10.1	11.7	12.0	32.8	42.4	46.8				7.8	10.8	12.6
9	14.2	19.0	23.7	12.0	14.0	14.7	41.2	54.3	61.3				8.4	12.0	14.5
10	15.0	20.0	25.0	13.8	16.5	17.5	49.9	67.2	77.5				8.7	12.9	16.2
11	15.7	20.9	26.1	15.6	18.9	20.5	58.9	80.9	95.2				9.0	13.7	17.6
12	16.3	21.7	27.1	17.4	21.4	23.5	68.0	95.2	114.0				9.1	14.2	18.8
13	16.8	22.3	27.9	19.1	23.8	26.6	77.1	109.8	133.8				9.1	14.6	19.8
14	17.2	22.9	28.7	20.8	26.2	29.6	86.2	124.7	154.4				9.1	14.9	20.6
15	17.6	23.5	29.3	22.4	28.6	32.7	95.1	139.7	175.6				9.0	15.0	21.2
16	18.0	24.0	29.9	23.9	30.9	35.7	104.0	154.8	197.1				8.8	15.1	21.6
17	18.3	24.4	30.5	25.4	33.2	38.7	112.6	169.8	218.9				8.7	15.0	21.8
18	18.6	24.8	31.0	26.9	35.4	41.7	121.1	184.6	240.9				8.5	14.9	22.0
19	18.8	25.1	31.4	28.2	37.5	44.5	129.4	199.4	262.9				8.3	14.7	22.0
20	19.1	25.4	31.8	29.6	39.6	47.4	137.4	213.9	284.8				8.0	14.5	21.9

## VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1. Conclusiones

Los datos provenientes de parcelas permanentes de muestreo, representan la contribución más importante para el desarrollo de sistemas de crecimiento y rendimiento maderable (SCRM).

Los resultados de la presente investigación representan información técnica que los administradores forestales de la plantación pueden utilizar para simular e identificar los mejores esquemas de manejo, tomar decisiones y planificar el proceso de producción forestal tanto en el presente como en el futuro.

El sistema de crecimiento y rendimiento generado puede ser utilizado para *Cedrela odorata* y *Tabebuia donell-smithii*, dado que no existen diferencias significativas ( $p < .0001$ ) en la predicción del crecimiento en altura dominante, área basal y volumen. No obstante, con la remediación de las parcelas en el tiempo pueden surgir diferencias que en edades tempranas no son perceptibles.

### 7.2. Recomendaciones

Continuar con las remediciones de los sitios de muestreo para obtener información más completa sobre el crecimiento y rendimiento maderable de ambas especies en la plantación.

Ampliar esta red de sitios de muestreo, a fin de ampliar el rango de inferencia de los datos.

Usar estos modelos con datos de inventarios forestales de las plantaciones, a fin de hacer la proyección a nivel operativo.

Se recomienda para estudios posteriores generar modelos de distribución de productos.

Establecer escenarios financieros sobre la rentabilidad de este tipo de plantaciones, y así, poder determinar el turno financiero de las mismas.

## VIII. LITERATURA CITADA

- Arteaga-Martínez, B. 2000. Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotoxtla, Guerrero. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 6(2): 151-157.
- Bustillos-Herrera, J. A., J. R. Valdez-Lazalde, A. Aldrete y M. de J. González-Guillén. 2007. Aptitud de terrenos para plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden): definición mediante el proceso de análisis jerarquizado y SIG. *Agrociencia* 41(7): 787-796.
- Clutter, J. L., J. C. Fortson, L. V. Pienaar, G. H. Brister y R. L. Bailey. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Jhon Wiley & Sons, Nueva York, 333 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2001. Programa estratégico forestal para México 2025. México, D. F. 191 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2009. Coordinación general de producción y productividad: plantaciones forestales comerciales. Consultado el 09 de Febrero de 2010: [http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com\\_content&task=blogcategory&id=45&Itemid=145](http://www.conafor.gob.mx/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=45&Itemid=145)
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2010. Gerencia Regional V. Coordinación General de Producción y productividad. Plantaciones Forestales Comerciales.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Contenido del proyecto para solicitar apoyos para el establecimiento de plantaciones para la producción de semillas forestales.

Coordinación General de Producción y Productividad. Gerencia de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales.

Crecente-Campo, F. 2008. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia. Tesis de doctorado. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela, España. 133 p.

Diéguez, A. U., M. Barrio A., F. Castedo D., A. D. Ruíz G., M. F. Álvarez T., J. G. Álvarez G. y A. Rojo A. 2003. Dendrometría. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 327 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2010. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. Última reforma 26-04-2012. México. 27 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2003. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Última reforma 04-06-2012. México. 70 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2005. Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. México. 44 p.

DOF (Diario Oficial de la Federación). 2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. NOM-059-SEMARNAT-2010. México. 78 p.

Domínguez A., F.A. 1996. Evaluación del crecimiento de *Mimosa scrabella* Benth. (Bracatinga), en dos municipios de la región central de Veracruz, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 76 p.

Edouard, F. s/f. Apropiación de sistemas agroforestales y gestión del territorio en la región de la Chinantla, Oaxaca. 10 p.

FAO (Food and Agriculture Organization). 2004. Estado y tendencias de la ordenación forestal en 17 países de América Latina. Consultado el 07 de octubre de 2012. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/008/j2628s/J2628S13.htm>

FAO (Food and Agriculture Organization). 2006. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005. Hacia la Ordenación Forestal Sostenible. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.

Francis, J.K. 1989. *Tabebuia donell-smithii* Rose. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 4 p.

Galán L., R., H. M. De los Santos P. y J.I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. Madera y Bosques 14(2): 65-82.

García, M. E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª.ed. México, D. F. 217 p.

García, O. 1988. Growth modelling—a (re)view”. *New Zealand Forestry* 33(3): 14–17.

García, O. 2007. Dimensionalidad en los modelos de crecimiento. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 23: 19-25.

Gómez-Tejero, J., H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González y J. R. Valdez-Lazalde.

2009. Modelos de crecimiento en altura dominante para *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden y *E. urophylla* S. T. Blake en Oaxaca, México. *Rev. Fit. Mex.* 32(2): 161-169.

Hernández R., E. 2010. Análisis de las evaluaciones externas del Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) 2000-2007. Tesis Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Texcoco, México. 59 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 1995. San Pedro Pochutla, Oaxaca. Cuaderno estadístico municipal. INEGI. Aguascalientes, México. 17 p.

Jerez-Rico, M., A. Y. Moret-Barrillas, O. E. Carrero-Gámez, R. E. Macchiavelli y A. M. Quevedo-Rojas. 2011. Curvas de índice de sitio basadas en modelos mixtos para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. F.) en los llanos de Venezuela. *Agrociencia* 45(1): 135-145.

Klepac, D. 1983. Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. 2ª ed., Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 365 p.

Laclau, J. P., J. C. R. Almeida, J. L. M. Goncalves, L. Saint-André, M. Ventura, J. Ranger, R. M. Moreira y Y. Nouvellon. 2009. Influence of nitrogen and potassium fertilization on leaf lifespan and allocation of above-ground growth in *Eucalyptus* plantations. *Tree physiology* 29: 111-124.

- Lamprecht, H. 1990. Silvicultura en los Trópicos. Los Ecosistemas Forestales en los Bosques Tropicales y sus Especies Arbóreas. Posibilidades y Métodos para un Aprovechamiento Sostenido. RFA. 335 p.
- Martínez-Ruiz, R., H. S. Azpíroz-Rivero, J. L. Rodríguez-De la O., V. M. Cetina-Alcalá y M. A. Gutiérrez-Espinoza. 2006. Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*. Ra Ximhai 2(3): 815-846.
- Morales H., J. 2012. Comentario personal. Agrosilvícola San José S. P. R. de R. L. Pochutla, Oaxaca.
- Morales H., A., A. Galindo A., L. Gama C. y E. Sánchez P. 2006. Propuesta de reforestación y enriquecimiento de la microcuenca el Polevía, Tenosique, Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. 10 p.
- Moscovich, F. 2004. Modelos de crecimiento y producción forestal. Informe técnico No 55. Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo. 42 p.
- Musálem, M. Á. 2006. Silvicultura de plantaciones forestales comerciales. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Departamento de Ecología y Silvicultura, Chapingo, México. 217 p.
- Niembro, A. 1986. Árboles y arbustos útiles de México. Limusa. México, D.F. 206 p.
- Palahí, M., T. Pukkala, J. Miina y G. Montero. 2003. Individual-tree growth and mortality models for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in north-east Spain. Ann. For. Sci. 60: 1-10.

- Pennington, T. D. y J. Sarukhán. 2005. Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies. 3ª ed., UNAM, Fondo de Cultura Económica, 523 p.
- Pérez S., R. 2010. Características edafológicas y potencial productivo de *Eucalyptus urophylla* y *E. grandis* en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México. 84 p.
- Rojas R., F. 1983. Plantaciones Forestales. 1a Edición. Editorial Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. 237 p.
- Romero, M. A., S. Castillo y H. Van Der Wal. 2000. Análisis florístico de la vegetación secundaria derivada de la selva húmeda de montaña de Santa Cruz Tepetotutla (Oaxaca), México. Boletín de la Sociedad Botánica de México 67: 89-106.
- Rose, C. E. y T. B. Lynch. 2001. Estimating parameters for tree basal area growth with a system of equation and seemingly unrelated regressions. *Forest Ecol. Manag.* 148: 51-61.
- Sandoval G., R. 2010. Crecimiento en diámetro y altura de tres especies tropicales de plantaciones comerciales en Pochutla, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. División de Agronomía. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Santiago G., W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 89 p.

Sarukhán, J. 1964. Estudio sucesional de un área talada en Tuxtepec, Oaxaca. En comisión de estudios sobre ecología de dioscoreas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Secretaría de Agricultura y Ganadería. México, pp. 107-172.

SAS Institute Inc. 2001.SAS/STAT user´s guide. Version 7.0 SAS Institute Inc. Cary, N. C.

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

SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2005. La gestión ambiental en México. 472 p.

Téllez G., E., M. de J. González, H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., R. J. Lilieholm y A. Gómez. 2008. Rotación óptima en plantaciones de eucalipto al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. Rev. Fit. Mex. 31(2): 173-182.

Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2005. Evaluación de plantaciones forestales. Editorial Limusa S.A. de C.V., México, 472 p.

Trujillo, E. s/f. Plantación Forestal: planeación del éxito. Forestal. Consultado el 02 de marzo de 2010: <http://www.revista-mm.com/rev51/forestal.pdf>

UACH (Universidad Autónoma Chapingo). 2007. Evaluación de los Apoyos para Plantaciones Forestales Comerciales. Ejercicio fiscal 2007. Chapingo, México. 173 p.

Valdez-Lazalde, J. R. y T. B. Lynch. 2000. Ecuaciones para estimar volumen comercial y total en rodales aclareados de pino patulaen Puebla, México. Agrociencia 34(6): 747-758.

- Vanclay, J. K. 1991. Modelling the growth and yield of tropical moist forests. Queensland Forest Service, Brisbane. 157 p.
- Vanclay, J. K. 1994. Modelling forest growth and yield, applications to mixed tropical forests. CAB INTERNATIONAL. Denmark. 312 p.
- Vanclay, J. K. 1995. Growth models for tropical forests: a synthesis of models and methods. Forest Science 41: 7-42.
- Villa-Salas, A. B. 2002. Plantaciones forestales comerciales. Una alternativa para la restauración y la reconversión productiva en el trópico húmedo. Forestal XXI 3(3): 14-16.
- Williams, L. H. 2001. Crecimiento del árbol. Tejidos del tallo adulto. Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal, Departamento de Botánica, Mérida, Venezuela. 20 p.
- Whitmore, T. C. 1984. Tropical rain forests of the far east. Oxford: Clarendon Press. England, 352 p.
- Zárate S., A. 2010. Operación inicial del Proyecto de Plantación Forestal "La Sabana". Memoria de Experiencia Profesional. Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Chapingo, Texcoco, México. 50 p.
- Zepeda B., E. M. y D. P. Rivero. 1984. Construcción de curvas anamórficas de índice de sitio: ejemplificación del método de la curva guía. Ciencia Forestal 51 (9): 3-36.