



Universidad de Valladolid



PROGRAMA DE DOCTORADO EN CONSERVACIÓN Y USO
SOSTENIBLE DE SISTEMAS FORESTALES

TESIS DOCTORAL:

**Desarrollo de índice de sitio, diagrama de manejo
de densidad y modelos selvícolas para
plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en
Tabasco, México**

Presentada por Djhon Minoche para optar al grado de
Doctor por la Universidad de Valladolid

Dirigida por:
Dr. Pablo Martínez Zurimendi
Dra. Celia Herrero de Aza

Tutora: Dra. María del Rosario Sierra de Grado



Doctorado en Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales

Tesis Doctoral

Título: Desarrollo de índice de sitio, diagrama de manejo de densidad y modelos selvícolas para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Tabasco, México

Autor: Djhon Minoche

Tutora: Dra. María del Rosario Sierra de Grado

Director 1: Dr. Pablo Martínez Zurimendi

Directora 2: Dra. Celia Herrero de Aza

Palencia, noviembre de 2020

Agradecimientos:

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todos los que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este trabajo:

en primer lugar quiero dar las gracias a mis tutores Pablo, Celia y Rosario por sus orientaciones y ayudas, tan valiosas en todo momento;

un especial agradecimiento al programa de becas para extranjeros de la *Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID)*, que me otorgó la beca para realizar esta tesis doctoral.

A toda mi familia, especialmente a mi madre Jeantilia, y a mis hermanos Marc-Anglade y Djimps por brindarme sus incondicionales apoyos;

a mi mujer y a mis dos niños: Phelps Josias y Keith Djessy por cambiar mi vida completamente.

A mi compañero de lucha Michel Juverson Boosener por su consejo y propuesta;

a todo el colectivo de los profesores del programa de doctorado "Conservación y Uso Sostenible de Sistemas Forestales" que se imparte en la Universidad de Valladolid, y en especial al director del programa Felipe Bravo.

A todos los amigos y compañeros que me echaron una mano cuando me hacía falta para poder avanzar con la tesis; estáis siempre en mi corazón.

A todos los compañeros de la promoción 2009-2011 del Máster y en general a todos los colegas del *Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible*;

a todos los compañeros del ONEV (*Observatorio Nacional de Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad*) del Ministerio de Medio Ambiente de mi país (Haití);

a todos los que de una forma u otra me brindaron su apoyo para la realización de esta tesis.

Índice general

Resumen	#
Abstract.....	#
Lista de artículos publicados	#
Esquema de la tesis.....	#
I. Introducción	1#
I.1 Especie analizada: Caracterización de <i>Tectona grandis</i> L.f.	4#
I.1.1 Área de distribución natural y de naturalización.....	5#
I.1.2 Distribución Artificial	6#
I.1.3 Condiciones climáticas.....	7#
I.1.4 Suelos y topografía.....	7#
I.1.5 Crecimiento de la especie.....	9#
I.2. Herramientas selvícolas utilizadas en teca	11#
I.2.1 Índices de sitio.....	11#
I.2.2 Sistemas de manejo de densidad	14#
I.2.3 Técnicas de simulación	15#
I.3. Objetivo.....	18#
II. Materiales y Métodos.....	19#
II.1 Zona de estudio	19#
II.2 Plantaciones estudiadas.....	20#
II.3 Procedimientos estadísticos	21#
II.3.1 Índice de sitio.....	21#
II.3.1.1 Relación altura-diámetro.....	21#
II.3.1.2 Modelos de índice de sitio	23#
II.3.1.2.1 Ajuste del modelo de índice de sitio	24#
II.3.1.2.2 Validación del modelo elegido	25#
II.3.1.2.3 Gráfico de las curvas de índice de sitio	25#
II.3.2 Diagrama de densidad.....	27#
II.3.2.1 Cálculo de las variables para las parcelas	27#
II.3.2.2 Análisis estadístico	27#
II.3.3 Simulación selvícola en SiManFor	30#

II.3.3.1 Selección de modelos utilizados en la simulación.....	30#
II.3.3.1.1 Índice de sitio y crecimiento en altura dominante	30#
II.3.3.1.2 Crecimiento en Área basimétrica y volumen.....	30#
II.3.3.1.3 Proyección de la masa.....	31#
II.3.3.1.4 Validación del simulador con los modelos seleccionados.....	32#
II.3.3.1.5 Simulaciones selvícolas para la ilustración de la tabla de producción .	32#
III. Resultados.....	36#
III.1 Índice de sitio.....	36#
III.1.1 Ajuste de la ecuación h-d.....	36#
III.1.2 Ajuste de la ecuación índice de sitio	37#
III.1.3 Validación de la ecuación índice de sitio	39#
III.1.4 Representación de las curvas de calidad.....	41#
III.1.5 Comparación con la ecuación de crecimiento desarrollada por Upadhyay...	41#
III.2 Diagrama de densidad	43#
III.2.1 Ajuste simultáneo de las ecuaciones que configuran el diagrama de densidad	43#
III.2.2 Representación del diagrama de densidad.....	43#
III.2.3 Itinerarios selvícolas	45#
III.3 Simulación selvícola en SiManFor.....	47#
III.3.1 Proyección en SiManFor	48#
III.3.2 Validación del proceso de simulación.....	48#
III.3.3 Simulación selvícola para la ilustración de la tabla de producción.....	51#
IV Discusión.....	57#
IV.1 Índice de sitio	57#
IV.2 Diagrama de densidad	61#
IV.3 Simulación selvícola	64#
IV.4 Discusión general	68#
Conclusiones.....	69#
Referencias bibliográficas	70#
Anexos	88#

Índice de tablas

Tabla 1.1. Área de plantaciones de teca en el año 2010 por región	6#
Tabla 2.1. Resumen de datos de los árboles de las parcelas utilizados en los tres trabajos de esta tesis	21#
Tabla 2.2. Modelos h-d ajustados	22#
Tabla 2.3. Parámetros estadísticos utilizados en la evaluación y validación de los modelos	24#
Tabla 2.4. Funciones candidatas para determinar el índice de sitio	25#
Tabla 2.5. Valores medios, mínimos, máximos y desviación típica de las variables dasométricas de las parcelas estudiadas (n=42 parcelas)	27#
Tabla 2.6. Modelos seleccionados para introducir en SiManFor y realizar una simulación selvícola en la especie <i>Tectona grandis</i>	31#
Tabla 3.1. Valores de estadísticos de los mejores modelos h-d para cada plantación.....	37#
Tablas 3.2. Características dasométricas de las parcelas utilizadas en el ajuste (n=25 parcelas) y validación (n=10 parcelas) de los modelos de índice de sitio para <i>Tectona grandis</i>	38#
Tabla 3.3. Resultados de los ajustes de los modelos de índice de sitio para <i>Tectona grandis</i>	38#
Tabla 3.4. Resultados de la validación de los modelos del índice de sitio	39#
Tabla 3.5. Resultados de los ajustes de los modelos para <i>Tectona grandis</i>	43#
Tabla 3.6. Manejo de densidad para <i>Tectona grandis</i> en Tabasco. Propuesta I.....	46#
Tabla 3.7. Gestión alternativa de manejo de densidad para <i>Tectona grandis</i> en Tabasco. Propuesta II.....	46#
Tabla 3.8. Descripción de los datos resultantes de la simulación utilizados en la validación	48#
Tabla 3.9: Resultados de la validación del simulador con los modelos seleccionados para cada variable.....	49#
Tabla 3.10. Simulación de las parcelas seleccionadas de teca a diferentes densidades. Propuesta I, claras fuertes.).....	53#

Tabla 3.11. Simulación de las parcelas seleccionadas de teca a diferentes densidades.

Propuesta II, claras débiles 54#

Índice de figuras

Figura 1.1. Población mundial y deforestación acumulada de 1800 a 2010.	2#
Figura 1.2. Superficie forestal por regiones geográficas y del mundo en 1990, 2010 y 2015.	3#
Fuente: FAO, 2018	3#
Figura 1.3. Especies que más se emplean en plantaciones industriales para la producción de madera en el mundo sin incluir <i>Cunninghamia lanceolata</i> (Lamb.) Hook y <i>Hevea</i> <i>brasiliensis</i> (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.....	4#
Fuente: Indufor (2012).....	4#
Figura 1.4. Área de distribución natural y de naturalización de <i>Tectona grandis</i> . Fuente: FAO (1998). Teak forest distribution (Distribución del bosque de teca); Native teak forest (Bosque nativo de teca); Naturalized teak forest (Bosque naturalizado de teca).....	5#
Figura 1.5. Suelos aptos para plantación de teca en Tabasco (las partes amarillas son las que son aptos para el cultivo de teca). Fuente: INEGI (Junio 2009) y elaboración propia del autor	8#
Figura 2.1. Localización de plantaciones de <i>Tectona grandis</i> L.f. en el Estado de Tabasco, México	19#
Figura 2.2. Plantación de teca en Tabasco	20#
Figura 2.3. Ejemplo del primer escenario de este trabajo en SiManFor	33#
Figura 2.4. Ejemplo del segundo escenario de este trabajo en SiManFor.....	34#
Figura 3.1. Pares de datos altura-diámetro por clase de edad de las diez plantaciones de <i>Tectona grandis</i> utilizados en el ajuste de los modelos altura-diámetro.....	36#
Figura 3.2. Observados vs predichos (altura dominante) del modelo de Sloboda (1971)...	40#
Figura 3.3. Residuales frente a la altura dominante y la edad, momento inicial y final del modelo de Sloboda (1971).....	40#
Figura 3.4. Curvas de calidad de estación para <i>Tectona grandis</i> L.f. en Tabasco según la ecuación de Sloboda (1971).	41#
Nota: Edad típica: 10 años, SI: índice de sitio.....	41#
Figura 3.5. Comparación de la evolución de las curvas de índice de Sloboda (1971) [línea sólida] para índices de sitio de 12, 15, 18, 21 y 24 m a una edad de referencia de 10 años,	

frente a las curvas desarrolladas por Upadhyay <i>et al.</i> (2005), [líneas punteadas] utilizando el modelo de Hosfeldt IV (Kiviste <i>et al.</i> , 2002) para 150 parcelas permanentes de todas las plantaciones de teca en la India, SIU: índice de sitio de Upadhyay y SIS: índice de sitio de Sloboda (el sombreado gris representa las zonas en que los valores de altura dominante y edad son una extrapolación).....	42#
Figura 3.6. Diagrama de densidad para <i>T. grandis</i> en Tabasco	44#
Figura 3.7. Localización de las 42 parcelas de teca medidas en el Estado de Tabasco (el sombreado gris representa las zonas en que los valores de altura dominante y volumen son una extrapolación)	45#
Figura 3.8. Diagrama del itinerario selvícola de la Propuesta I para teca en Tabasco (Tratamiento recomendado para conseguir la máxima producción en volumen por hectárea con un origen de una plantación real con 880 pies ha ⁻¹)	47#
Figura 3.9. Alternativa de manejo de densidad de la Propuesta II de teca en Tabasco (Tratamiento recomendado para conseguir el máximo crecimiento diamétrico del árbol individual, punto de partida 816 árboles/ha, espaciamiento 4*3 ó 3,5*3,5)	47#
Figura 3.10. Evolución de las variables de masa en las parcelas tras la simulación del escenario selvícola en SiManFor: a) Volumen (V); b) Altura dominante (H); c) Área basimétrica (G). Evolución de las mismas variables en una selección de parcelas medidas en campo: d) Volumen (V); e) Altura dominante (H); f) Área basimétrica (G)	49#
Figura 3.11. Relación lineal entre valores predichos y observados para las variables G, H y V	50#
Figura 3.12. Normalidad de los residuos para las variables G, H y V simuladas	51#
Figura 3.13. Evolución de la densidad de la masa y el volumen de dos parcelas simuladas en la plataforma SiManFor con dos densidades iniciales diferentes (baja y alta) para el tratamiento de claras más fuertes: Propuesta I	55#
Figura 3.14. Evolución de la densidad de la masa y el volumen de dos parcelas simuladas en la plataforma SiManFor con dos densidades iniciales diferentes (baja y alta), aplicando la selvicultura de la propuesta II, claras débiles	56#
Figura 4.1. Esquema visual comparando las diferentes herramientas generadas en la tesis	57#

Tabla de símbolos utilizados

Abreviaturas	Significado
Variables explicativas	
IS	índice de sitio (m)
Hm	altura media (m)
H	altura dominante (m)
H ₀ , H ₁ y H ₂	alturas dominantes en diferentes momentos: edad base, inicial y final
H _{obs}	altura dominante observada (m)
H _{pre}	altura dominante predicha (m)
h _t	altura total del árbol (m)
dbh	diámetro normal (cm)
G	área basimétrica (m ² ha ⁻¹)
G _{obs}	área basimétrica observada (m ² ha ⁻¹)
G _{pre}	área basimétrica predicha (m ² ha ⁻¹)
D _m	diámetro medio (cm)
D _g	diámetro medio cuadrático (cm)
t	edad (años)
t ₀	edad base (años)
t ₁	edad inicial (años)
t ₂	edad final (años)
N	número total de árboles o pies medidos en el área
\$	dólar americano
V _i	volumen individual (m ³)
V	volumen de madera de la parcela (m ³ ha ⁻¹)
V _t	volumen total de la plantación (m ³ ha ⁻¹)
V _{obs}	volumen observado (m ³ ha ⁻¹)
V _{pre}	volumen predicho (m ³ ha ⁻¹)
D _{dom}	diámetro dominante (cm)
h-d	relación altura-diámetro
SSE	suma de cuadrado del error
MSE	error cuadrático medio

Abreviaturas	Significado
Y_i	valor observado
\hat{Y}_i	valor estimado con el modelo
AMRES	media absoluta de los residuales
SSC	suma de cuadrados total
SCR	suma de cuadrados medios de los residuales
RMSE	raíz del cuadrado medio del error
EF	eficiencia
AIC	criterio de información Akaike
R^2_{adjpond}	coeficiente de determinación ajustado ponderado
R^2	coeficiente de determinación
Organizaciones, instituciones	
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
CONAFOR	Comisión Nacional Forestal de México
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México
FUMIAF	Fundación Mexicana para la investigación Agropecuaria y Forestal
PROTEAK	Empresa Forestal establecida en México
SANTA	
GENOVEVA	Empresa Forestal establecida en México
SiManFor	Sistema de Simulación de Manejo Forestal Sostenible
EEUU	Estados Unidos
AECID	Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
ONEV	Observatorio Nacional de Medio Ambiente y de la Vulnerabilidad del Ministerio de Medio Ambiente de Haití
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
ONU	Organización de las Naciones Unidas
Unidades de medición y otros	
ADA	Diferencia algebraica
GADA	Diferencia algebraica generalizada
DMD	Diagrama de manejo de densidad

Abreviaturas	Significado
IMA	Incrementos medios anuales
ha	hectárea
m ³	metro cúbico
m ²	metro cuadrado
m	metro
cm	centímetro
mm	milímetro
msnm	metros sobre el nivel del mar
log	logaritmo decimal
ln	logaritmo neperiano
LMD	límite de máxima densidad
LIC	línea de inicio de competencia
RS	índice separación relativa
SDI	índice de Reineke
US	(United States) Estados Unidos
Eq.	ecuación
%	porcentaje
°C	grado Celsius
°N	coordenada geográfica (latitud norte)
pH	potencial de hidrogeniones

Resumen

La teca (*Tectona grandis* L.f.) es una de las especies más productivas utilizadas en plantaciones forestales en el ámbito tropical y en concreto, en México. Debido a que existe una creciente demanda mundial de madera fina hay una interesante oportunidad de establecer plantaciones con buenas perspectivas de comercialización. Las cualidades físicas de la madera de la especie le han dado una buena reputación para inversores y productores forestales en el mundo.

En la siguiente tesis doctoral se han desarrollado distintas herramientas científico-técnicas de gestión para las plantaciones de teca en Tabasco, México. Así, se ha determinado el índice de sitio mediante el método de ecuaciones en diferencias finitas con datos de parcelas permanentes. Por otra parte, se ha obtenido el diagrama de densidad y se ha realizado un modelo de simulación selvícola para predecir la evolución de la plantación en distintos escenarios selvícolas. Con estas herramientas se podrán realizar previsiones de producción a lo largo del turno y considerar las condiciones selvícolas más adecuadas para los objetivos de la plantación, así como simular los resultados que se alcanzarían con diferentes intervenciones selvícolas.

Para lograr los tres objetivos planteados se ha utilizado una base de datos de altura y diámetro de árboles de 35 parcelas permanentes establecidas en 10 plantaciones de teca recogida durante los años 2003, 2004, 2005 y 2006 para los trabajos de índice de sitio y de la simulación selvícola. Siete parcelas adicionales fueron añadidas para realizar el trabajo de diagrama de densidad quedando un total de 42.

Para determinar el índice de sitio se ajustaron cinco modelos, cuatro de ellos se basaron en el planteamiento de modelos de ecuaciones de diferencias finitas y una función no integrada. Se eligió el más adecuado en función de los parámetros estadísticos de la bondad del ajuste y de la validación con una submuestra de datos de las plantaciones. El modelo finalmente seleccionado fue el de Sloboda (1971), con el que se construyeron las curvas de índice de sitio para el Estado de Tabasco. Los resultados permitieron determinar la existencia de cinco calidades de estación con índices de 12, 15, 18, 21, 24 metros respectivamente, para la edad base de 10 años. La validación como el mejor modelo presenta una eficiencia de 0.9377 y una raíz del cuadrado medio del error de 0,0803. Se

compararon los resultados obtenidos en este trabajo con el modelo propuesto por Upadhyay *et al.* (2005), modelo utilizado en otras regiones. El modelo obtenido es una herramienta útil para la evaluación de la calidad de estación y para mejorar la planificación y la gestión de las plantaciones de teca en el Estado de Tabasco.

Por otro lado, se determinó el diagrama de manejo de densidad (DMD) para la teca, herramienta de gran valor para planificar intervenciones selvícolas en un momento dado. Para ello, se ajustaron dos ecuaciones simultáneamente, una que relacionó el diámetro medio cuadrático con la densidad de la masa y la altura dominante y la otra que relacionó el volumen total de la masa con el diámetro medio cuadrático, la altura dominante y la densidad de la masa. En el DMD se realizaron dos propuestas selvícolas de manejo de densidad para la especie aplicando diferentes regímenes de clara. Con el diagrama de densidad, los selvcultores pueden planificar y evaluar las consecuencias de distintos regímenes de manejo selvícola alternativos para la toma de decisiones al describir cuantitativamente el rodal, de acuerdo con las existencias, sin considerar su edad.

Finalmente, se programó un modelo de simulación para las plantaciones de teca en el Estado de Tabasco en México en la plataforma SiManFor. Utilizando los modelos de Camacho (2014), Tamarit (2013) y de Tamarit *et al.* (2013) se hicieron dos simulaciones y dos tablas de producción. El modelo desarrollado constituye una herramienta de gestión selvícola al permitir simular la evolución de estas plantaciones de acuerdo con su edad, bajo diferentes supuestos de gestión.

Los resultados de esta tesis, obtenidos en estas 10 plantaciones, se pueden extrapolar a plantaciones de teca de la región de Tabasco, puesto que son herramientas que permiten optimizar la productividad de la masa forestal y la mejor opción selvícola en el marco de la gestión.

El conocimiento de productividad de las plantaciones de teca a través del estudio del índice de sitio, el diagrama de densidad y la simulación de escenarios puede influir en la toma de decisiones de los gestores ya que los modelos son usados con frecuencia como ayuda en la planificación del manejo de los recursos forestales en todo el mundo.

Abstract

Teak (*Tectona grandis* L.f.) is one of the most productive and used species in forest plantations in the tropical area and in Mexico. Because there is a growing global demand for fine wood, there is an interesting opportunity to establish plantations with good marketing prospects. The physical properties of the wood of the species have given it a good reputation for investors and forest producers in the world. In the following doctoral thesis, various mathematical tools were built to analyze the evolution of the species proposed for this purpose in the Tabasco State (Mexico). Thus, the site index has been determined using the method of finite difference equations with data from permanent plots. Additionally, the density diagram has been obtained and a silvicultural simulation model has been developed in order to predict the behavior and the evolution of the plantation in different silvicultural scenarios.

With these tools, production forecasts can be made throughout the rotation and consider the most appropriate silvicultural conditions for the objectives of the plantation, as well as simulate the results that would be achieved with different decisions.

To accomplish with the three objectives outlined above, data used consisted of tree height and diameter of 35 permanent plots distributed in 10 plantations that were measured in the years 2003-2004-2005 and 2006 for site index and silvicultural simulation works. Seven additional plots were added to complete the density diagram work for a total of 42.

To determine the site index, five models were adjusted, four of them were based on proposed finite difference equations and a non-integrated function. The most suitable of the five models was chosen taking into account the goodness of fit, the residual analysis, and the validation with a subsample of data from the plantations. The Sloboda (1971) model was finally selected, with which the Site Index curves for the Tabasco State were constructed. The results allowed the determination of five sites, with indexes of 12, 15, 18, 21 and 24 meters at a reference age of 10 years. The validation as the best model is given by an efficiency of 0.9377 and a root of the mean square of the error of 0.0803. The results obtained in this work were compared with the model proposed by Upadhyay *et al.*, (2005), used in other regions. This model is proven to be a useful tool, not only in evaluating site, but also in improving the planning and management of teak plantations in Tabasco.

On the other hand, the density management diagram (DMD) was determined for teak, a valuable tool for planning silvicultural interventions at a given time. For this, two equations were simultaneously fitted to do that, one related to the quadratic mean diameter of stand density and dominant height, and the other one, the total stand volume to the quadratic mean diameter, stand density and dominant height. Two silvicultural proposals were presented for density management for the species applying different thinning regimes. Results showed acceptable predictive capabilities, taking into consideration the usefulness and accuracy of this tool for planning silvicultural interventions. With this diagram, stakeholders can plan and evaluate the consequences of different alternative silvicultural management regimes for decision making by quantitatively describing the stand, based on stock, regardless of age.

Finally, a simulation model was programmed for teak plantations in the State of Tabasco in Mexico on the SiManFor platform. Using the Camacho (2014), Tamarit (2013) and Tamarit *et al.* (2013) models, two simulations and two production tables were presented. The model developed is a tool for silvicultural management and helps simulate the evolution and production according to their age of these plantations of *Tectona grandis* in Tabasco under different management assumptions and formulate at the same time the guidelines of management.

The results of this thesis allow to extrapolate those obtained in these 10 plantations to the teak plantations of the region of Tabasco, since they are tools that allow optimizing the productivity of the forest mass and the best silvicultural option within the framework of management.

The knowledge of the productivity of teak plantations through the study of the site index, the density diagram and the simulation can influence the decision-making of the managers since the models are frequently used as an instrument in order to plan the management of forest resources throughout the world.

Lista de artículos publicados

La siguiente tesis está dividida en tres estudios fundamentales. Los dos primeros trabajos fueron publicados en revistas internacionales indexadas. Estos trabajos publicados se enumeran a continuación:

Minoche D, Herrero de Aza C, Dominguez-Dominguez M, Martínez-Zurimendi P. 2017. Determining the site index of Teak (*Tectona grandis* L.) plantations in Tabasco, Mexico. *Cien. Inv. Agr.* 44(2): 154-167. -doi: 10.7764/rcia.v44i2.1645.

Minoche D, Risio-Allione L, Herrero de Aza C, Martínez-Zurimendi P. 2017. Density management diagram for teak plantations in Tabasco, Mexico. *iForest* 10: 909-915. – doi: 10.3832/ifor2247-010.

Esquema de la tesis

La siguiente tesis está dividida en tres estudios fundamentales que tienen como objetivo desarrollar herramientas científico-técnicas para plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Tabasco, México.

1. El trabajo del índice de sitio tiene como objetivo determinar el índice de sitio para la teca en Tabasco (México). En esta parte se pretende saber cuál es la relación que tiene el crecimiento de la teca con respecto al sitio de establecimiento y construir curvas de calidad para la especie. Así mismo, se pretende analizar el modelo que presenta mejor ajuste y mejor resultado de validación y se calculará el rango de valores de índices de sitio en función de las alturas dominantes.
2. La construcción del diagrama de densidad tiene como objetivo construir un diagrama de densidad y a la vez proponer diferentes tipos de regímenes de gestión para que los gestores tengan esta potente herramienta como ayuda en la toma de decisiones en las plantaciones de teca.
3. El trabajo de simulación selvícola presenta un modelo de simulación que describe el comportamiento de la especie en función de la edad para predecir y simular el comportamiento futuro de estas plantaciones. Asimismo, pretende proporcionar mediante el modelo seleccionado una norma de selvicultura recomendada para las plantaciones de teca.

I. Introducción

Los bosques cubren unos 4 000 millones de hectáreas en el mundo, lo que representa el 31 % de la superficie terrestre del planeta (FAO, 2016; FAO y PNUMA, 2020). Más de mil millones de personas dependen de los bosques para su sustento, siendo 350 millones los que reciben ingresos considerables de los bosques y cultivos arbóreos. Por otra parte, 60 millones de personas dependen casi totalmente de los bosques para su subsistencia y 60 millones de personas están empleados en industrias forestales en todo el mundo (FAO, 2012). Por otra parte, a comienzos del siglo XXI, más de mil millones de personas dependían totalmente de fármacos derivados de plantas forestales para su cuidado médico (Blaser y Douglas, 2000).

Los bosques son de gran importancia para la humanidad, no solo por la vital función que juegan en la naturaleza, sino también por la gran cantidad de productos que nos ofrecen. Por otra parte, proporcionan numerosos servicios ecosistémicos para el medio ambiente y el clima. Son además un importante recurso económico, no solo para la producción de madera sino también de otros recursos utilizados en la medicina y otros productos (ALIANZA, 2019).

Se estima que a lo largo de 5 000 años la deforestación total de terreno forestal en todo el mundo ha ascendido a 1 800 millones de hectáreas, lo cual supone un promedio neto de pérdida de 360 000 hectáreas al año (Williams, 2002). El crecimiento demográfico y el auge de la demanda de alimentos, fibra y combustible han acelerado el ritmo de deforestación (Figura 1.1) hasta el punto de que en los últimos años el promedio anual neto de desaparición de bosques llegó a los 5,2 millones de hectáreas (FAO, 2010). De acuerdo con la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de 2005, más del 60 % de los principales ecosistemas del mundo están degradados o se gestionan de manera no sostenible (FAO, 2012).

La figura ofrecida por la FAO presenta una detallada ilustración del estado de la vegetación del planeta para los años 1990, 2010 y 2015 respectivamente (Figura 1.2) (FAO 2018). La pérdida de bosques se registra principalmente en los países en desarrollo, en particular en el África subsahariana, América Latina y África septentrional y Asia sudoccidental. Los datos

obtenidos por este organismo internacional demostraron que la superficie forestal mundial disminuyó en general.

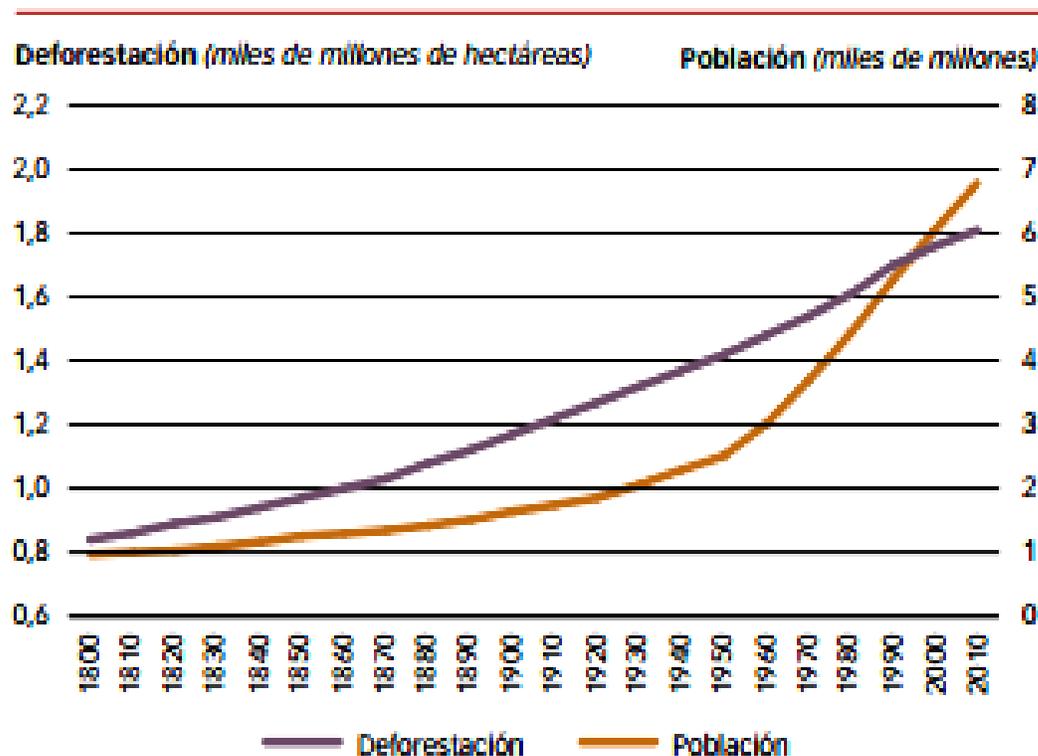


Figura 1.1. Población mundial y deforestación acumulada de 1800 a 2010.
Fuente: FAO, 2010

Las tasas de deforestación y crecimiento demográfico conducen a un incremento en la toma de conciencia hacia la gestión forestal sostenible de los bosques. Se requiere una información cada vez más precisa y completa que facilite la estimación de las posibilidades de desarrollo de estos recursos (Prebble, 1999). Además, esta misma idea se orienta hacia la importancia de los bosques y los productos forestales en la lucha contra el cambio climático ya que son el mayor sumidero de carbono terrestre del planeta, cruciales en la regulación del clima y el mayor nicho de biodiversidad del planeta (ONU, 2020). También, se puede aprovechar una parte importante de los residuos que quedan en el bosque después de los tratamientos selvícolas llegando a un equilibrio entre la cantidad de madera muerta que permanezca en el rodal y que beneficie la biodiversidad asociada, con el peligro de incendios y de plagas y enfermedades. Pero no sólo eso, también son fuente de recursos renovables y deben ser el sustituto de los productos de la economía gris basada en petróleo

y materiales no renovables por una bioeconomía verde ubicada dentro de los límites de la sostenibilidad (FAO, 2013). Según Guariguata (2009), el manejo de plantaciones forestales ofrece oportunidades para implementar medidas de adaptación, tanto industrial como de pequeña escala. En este sentido, las plantaciones forestales representan una alternativa viable puesto que permiten obtener productos en turnos más cortos y así reducen la presión sobre los bosques naturales y abastecen la alta demanda de madera.

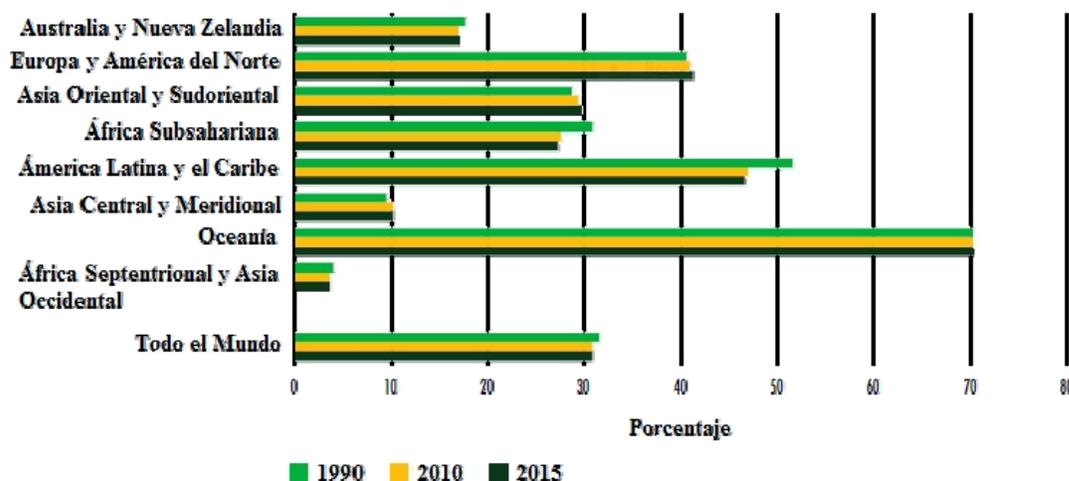


Figura 1.2. Superficie forestal por regiones geográficas y del mundo en 1990, 2010 y 2015.
Fuente: FAO, 2018

Las especies más utilizadas en plantaciones forestales de uso industrial en zonas tropicales son las acacias (*Acacia nilotica* (L.) Willd. ex Delile, *Acacia mangium* Willd., *Acacia mearnsii* De Wild., *Acacia senegal* Willd., *Acacia seyal* Delile), los eucaliptos (*Eucalyptus camaldulensis* Dhnh., *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden, *Eucalyptus saligna* Sm., *Eucalyptus urophylla* S.T.Blake), la teca (*Tectona grandis* L.f.), la gmelina (*Gmelina arborea* Roxb.), y algunas especies de pinos (*Pinus caribaea* Morelet, *Pinus elliottii* Engelm., *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.) (Figura 1.3). La especie plantada con la mayor superficie a nivel mundial es *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. (Prado, 2015). Sin embargo, las especies frondosas más importantes por la calidad de su madera en plantaciones en selvicultura tropical son el cedro (*Cedrela odorata* L.), las caobas común (*Swietenia macrophylla* King) y antillana (*Swietenia mahagoni* (L.) Jacq.) junto con la teca.

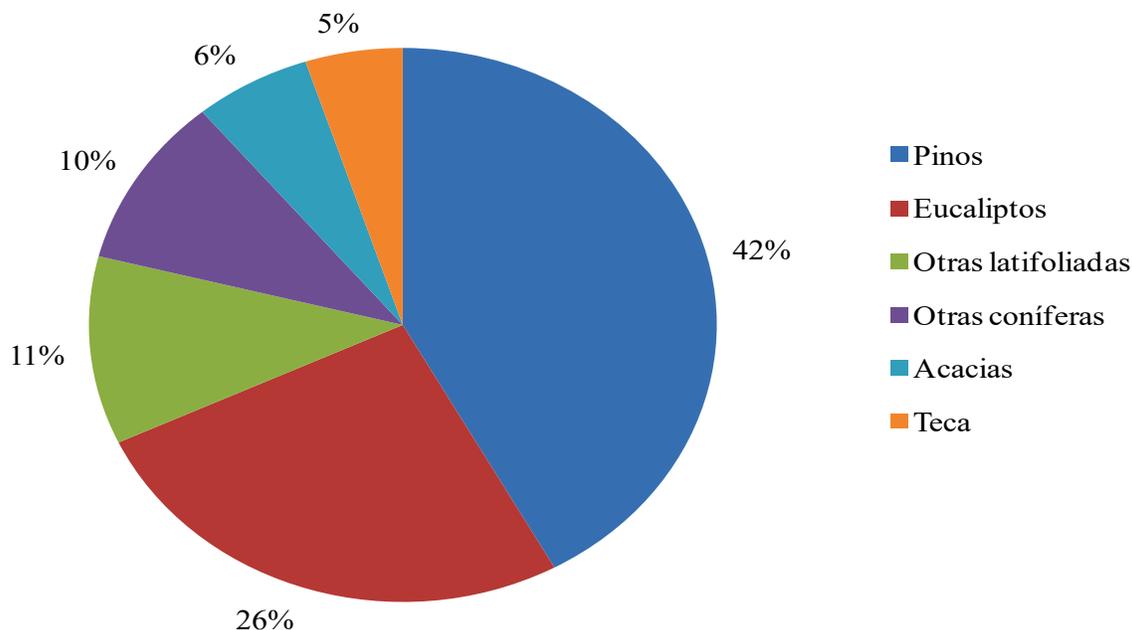


Figura 1.3. Especies que más se emplean en plantaciones industriales para la producción de madera en el mundo sin incluir *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook y *Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.
Fuente: Indufor (2012)

I.1 Especie analizada: Caracterización de *Tectona grandis* L.f.

Tectona grandis es una especie latifoliada que pertenece a la familia Verbenaceae. Es un árbol grande, decíduo, que puede alcanzar más de 50 m de altura y 2 m de diámetro en su lugar de origen. La teca se desarrolla en forma natural en varios tipos de bosques caducifolios alcanzando dimensiones mayores en climas húmedo-tropicales que presenten un período de sequía breve y bien definido durante el año.

En el bosque natural se encuentran árboles de teca de forma aislada, pero pueden formar agrupaciones prácticamente puras en lugares donde las condiciones son favorables. La teca es una especie heliófila, con alta demanda de luz vertical total y requiere de un espacio amplio alrededor para alcanzar un desarrollo apropiado.

La teca posee una de las maderas más valiosas del mundo y la demanda de la madera de teca por las industrias ha ido creciendo en los últimos años a nivel mundial porque es una madera altamente durable, estéticamente atractiva, fuerte y relativamente liviana. Cabe destacar que en los últimos años las plantaciones de teca más importantes provienen de Latinoamérica, exportando troncos jóvenes de teca (cuyo turno de corta se estima entre los 20 a 25 años de edad) hacia India, Europa y EEUU (Anantha-Padmanabha, 2006). Actualmente, la madera de teca para aserrío tiene un alto valor comercial, oscilando los

precios de troncos de teca de plantación importados hasta el 2006 desde 225 US \$ m⁻³ hasta 1000 US \$ m⁻³, dependiendo del tamaño y la calidad (Anantha-Padmanabha, 2006; ITTO, 2018).

I.1.1 Área de distribución natural y de naturalización

Hay bosques naturales de teca en el Sur de Asia, en la India, Myanmar, Tailandia y Laos (Figura 1,4). Su distribución está entre las latitudes 25°N y 9°N y las longitudes de 73°E a 104°E (White, 1991). La distribución natural no es continua. Así, la población oriental de Indochina se considera distinta a la población occidental de India. También se ha encontrado naturalizada en el sur del ecuador, en Java y en algunas pequeñas islas del Archipiélago Indonesio. El nombre común para el mercado internacional es teak, pero existen muchos otros nombres vulgares también: sagun, tegu, tegina, lyiu, thekku en India; kyun en Myanmar; mai sak en Tailandia; jatí en Indonesia; fatí en Malasia; teca en América Latina o teck en Francia (Chudnoff, 1984; Keiding, 1985).

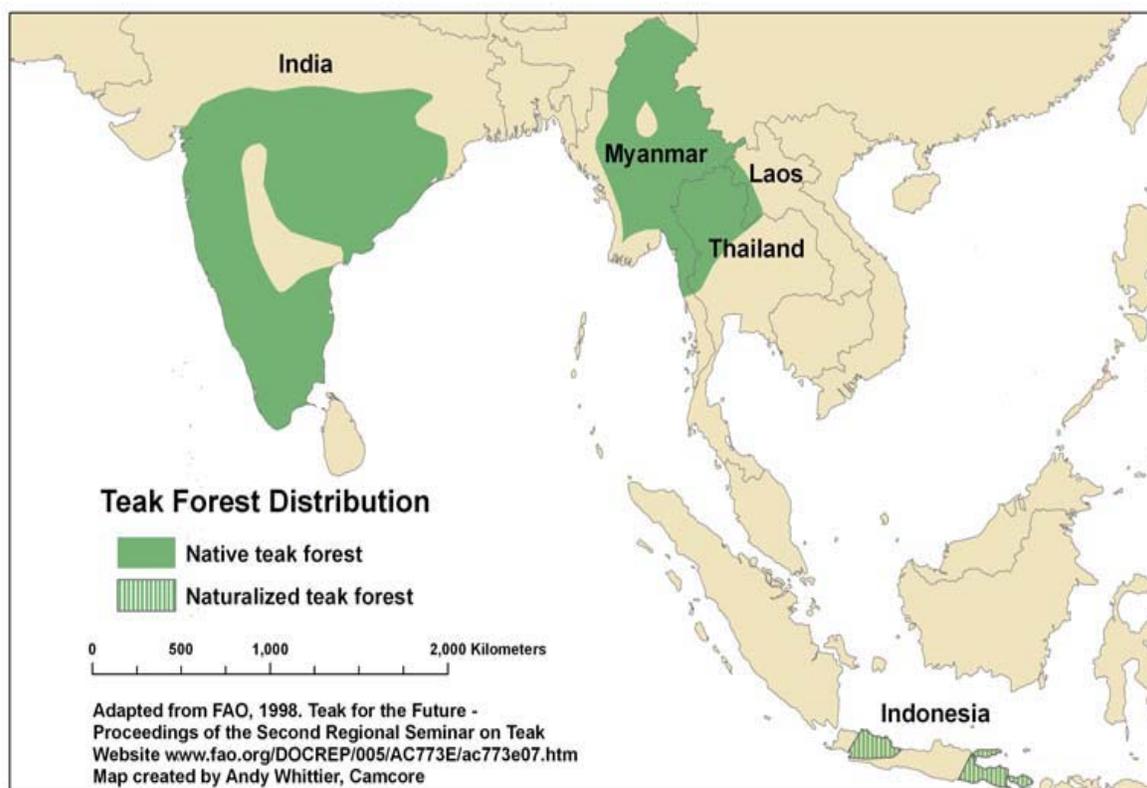


Figura 1.4. Área de distribución natural y de naturalización de *Tectona grandis*. Fuente: FAO (1998). Teak forest distribution (Distribución del bosque de teca); Native teak forest (Bosque nativo de teca); Naturalized teak forest (Bosque naturalizado de teca)

I.1.2 Distribución Artificial

En el año 2010, había 4,3 millones de hectáreas de plantación de teca, o sea, el 3 % de las plantaciones forestales del mundo (Kollert y Cherubini, 2012; Kollert y Walotek, 2015; 2017) (Tabla 1.1). En la tercera conferencia mundial sobre la teca, Kollert y Walotek (2015) han estimado una expansión de las plantaciones de teca desde 2010 en más de 1 millón de hectáreas para cubrir 5.37 millones de hectáreas en 2015. La gran mayoría de las plantaciones están en Asia (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Área de plantaciones de teca en el año 2010 por región

Región	Superficie (ha)
África	469 800
Asia	3 598 040
Caribe	15 320
Centro América	132 780
Oceanía	17 500
Sur América	8 132
Total mundial	4 346 370

Por la calidad de la madera, *Tectona grandis* ha sido introducida en una gran cantidad de lugares que tienen clima tropical, entre los 18°N y 28°N. De hecho, la especie fue plantada primero en el sureste de Asia, en Indonesia, Sri Lanka, Vietnam, Malasia, Islas Salomón, en algunos países africanos como Costa de Marfil, Nigeria y Togo desde el año 1902 (Horne, 1966; Kadambi, 1972) y en muchos países de América Latina.

En el neotrópico fue introducida primero en Trinidad en 1913, con semillas procedentes de Myanmar (Streets, 1962). Esta procedencia ha sido ampliamente distribuida, exportándose semilla de Trinidad a Belice, Antigua, República Dominicana, Jamaica, Cuba, Colombia, Venezuela, Haití, Puerto Rico, Ecuador, Guayana Francesa y México.

La especie se introdujo en América Central, en Panamá, en 1926 particularmente en el Jardín Botánico de Summit en lo que era entonces la Zona del Canal de Panamá (De Camino *et al.*, 2002) con semilla procedente de Sri Lanka, de esta procedencia se enviaron semillas a la mayoría de países de América Central y el Caribe. Las primeras plantaciones en Costa Rica se establecieron entre los años 1926 y 1929. Otros países en donde se han

establecido plantaciones son Brasil, Perú, Salvador, Honduras, Bolivia, Ecuador y Jamaica. La teca se introdujo por primera vez en México en 1950 por la Comisión del Papaloapan, con el establecimiento de 50 hectáreas de plantaciones en Tabasco, Veracruz, Chiapas y Campeche (FUMIAF, 2005).

En la actualidad existe un gran interés por cultivar e invertir en la teca en México. Entre 2001 y 2010 se desarrollaron 139 grandes proyectos de plantaciones forestales comerciales con teca, que se ubicaban principalmente en los Estados de Campeche, Veracruz, Tabasco, Chiapas y Nayarit. Estos proyectos abarcaban una superficie de 34 700 hectáreas plantadas al concluir el año 2007. La teca es la tercera especie más plantada en México y Tabasco específicamente, solo superada por *Cedrela odorata* y *Eucalyptus spp.* Según CONAFOR (2015), entre 2000-2014, las plantaciones comerciales de teca representan 15 % de todas las plantaciones forestales comerciales de México y 29 % para el Estado de Tabasco.

I.1.3 Condiciones climáticas

La especie crece en su área natural en una amplia gama de sitios con altitudes de 0 a 1200 metros sobre el nivel del mar (msnm) y precipitaciones entre 500 y 5000 mm anuales. Sin embargo, prefiere los valores en medio de ese rango (1000-2500 mm) con una estación seca de 2 a 5 meses, pero puede sobrevivir a condiciones extremas de humedad y sequía (Louppe, 2005). La teca soporta regiones cálidas que no se exponen a heladas. En su área de distribución natural la teca crece bien cuando las temperaturas promedio anuales varían de 13 a 35°C, pero su óptimo se encuentra en un rango de 22 a 28°C. En general, se planta en las zonas bajas tropicales. Los mejores rendimientos de la especie se dan en elevaciones inferiores a 600 msnm (Chaves y Fonseca, 1991).

I.1.4 Suelos y topografía

La teca se adapta a gran variedad de suelos, pero prefiere suelos planos, aluviales y coaluviales con pH neutro o ligeramente ácidos entre 6 y 7, de textura franco-arenosa o arcillosa, profunda, fértiles, bien drenados (Fonseca, 2004). Es exigente a nivel nutricional en los contenidos de elementos como calcio (Ca), fósforo (P) y magnesio (Mg). El contenido de Ca es un factor importante, ya que la deficiencia de Ca en el suelo se refleja en arboles raquíticos. La teca no tolera los suelos inundables o suelos lateríticos infértiles (Centeno, 1997; Trujillo, 2014). En general, se encuentra en terrenos de colinas onduladas,

pero también se puede desarrollar en llanuras aluviales. En Centro América se han establecido plantaciones desde 16 msnm hasta 600 msnm, mientras en Costa Rica las plantaciones situadas a mayor altitud se encuentran a pocos msnm (Chaves y Fonseca, 1991). Vaides (2004) considera que las plantaciones de teca se deben establecer en terrenos con elevaciones menores de 220 msnm y que no excedan una pendiente de 40 %, y con poca pedregosidad. Las zonas de Tabasco aptas para establecer plantaciones de teca están representadas en la figura 1.5. En el Estado de Tabasco, las plantaciones de teca se instalan mayoritariamente en antiguos ranchos ganaderos. Mediante estas plantaciones los terrenos vuelven a su uso forestal, ya que eran antiguas selvas (selva alta perennifolia, selva mediana perennifolia, selva baja caducifolia) que fueron convertidas en pastizales para la ganadería bovina hace 30 ó 40 años.

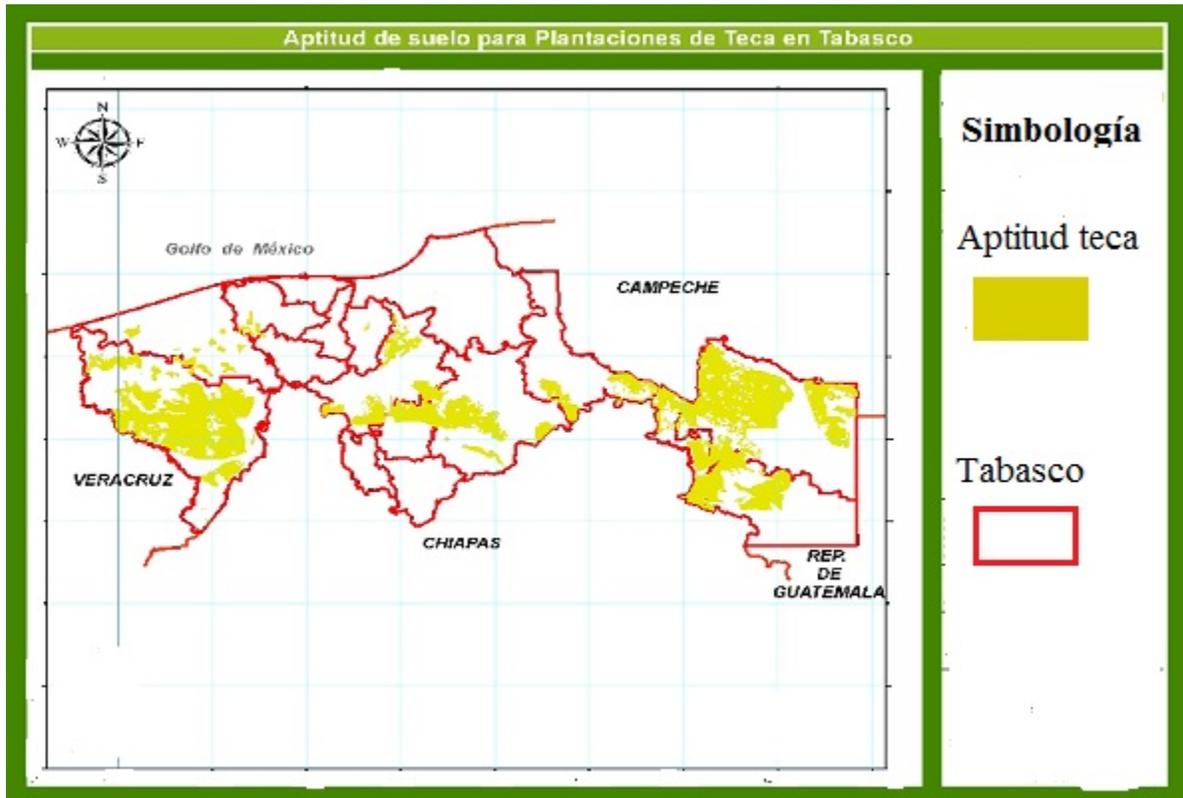


Figura 1.5. Suelos aptos para plantación de teca en Tabasco (las partes amarillas son las que son aptos para el cultivo de teca). Fuente: INEGI (Junio 2009) y elaboración propia del autor

I.1.5 Crecimiento de la especie

El crecimiento juvenil de las plantaciones de la teca es bastante rápido, pero en turnos muy largos el crecimiento medio es bajo. El manejo de la teca con turnos largos tiene su base en los conceptos forestales de otra época, cuando había bosques extensos de teca en el Sur de Asia, donde los gobiernos eran los dueños de la tierra y antes del desarrollo de la tecnología moderna de la madera. Los modelos de crecimiento recientes en el Norte de Ghana muestran tasas de crecimiento de $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 24 años y con alturas de 20 m en los mejores sitios, mientras en los sitios de segunda clase, las tasas son de $9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a los 24 años con alturas de 15 m (Oteng-Amoako y Sarfo, 2003). Datos en Sierra Leona (oeste de África) muestran una tasa de crecimiento de casi $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en un turno de 25 años (Brima y Sesay, 2020). En Myanmar, las claras de la teca producen entre 12 y $17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para llegar a la corta final a los 30 años (FAO, 1999). En Indonesia, Trinidad y Tobago, se han registrado incrementos medios anuales (IMA) en volumen relativamente altos, de más de $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Ball *et al.*, 1999). Mientras que en Centroamérica se ha registrado un rendimiento de $12,2\text{-}13,3 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para una plantación con un turno de corta de 25-28 años (Arias, 2003).

México cuenta con 270 000 hectáreas de plantaciones forestales comerciales (CONAFOR, 2015), ubicadas principalmente en los Estados de Campeche, Veracruz, Tabasco, Chiapas y Yucatán (CONAFOR, 2005). En esas plantaciones forestales comerciales la teca es la tercera especie más plantada. En el Estado de Tabasco existen 541 000 ha de terrenos aptos para establecer plantaciones de teca. La superficie plantada de teca en 2008 era el 9 % de las plantaciones forestales comerciales. La producción potencial en el Estado se cifra en torno a $13,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (entre 10 y 18 dependiendo de la calidad de estación). Los turnos de corta, es decir, la rotación de la plantación se establece entre 30 y 60 años dependiendo de los productos esperados.

Las plantaciones de teca alcanzan una superficie importante en México y además presentan una tendencia creciente. Las rotaciones aceptables para teca van desde los 15 a los 25 años de edad y los crecimientos reales en volumen en pie comercializable van desde $6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a un máximo de $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CONAFOR, 2012). Un dato medio de crecimiento para rodales de calidad media-alta en México, son $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (CONAFOR, 2012).

Según De Camino *et al.* (2013) en una plantación en el límite bajo de los supuestos, se puede esperar que en una primera clara se extraigan unos $20 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, pero de volúmenes no comerciales. En una segunda clara se pueden obtener unos $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de volumen comercial. En la corta final, se pueden esperar unos $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, con lo que la producción total es de unos 120 m^3 (promedio de $6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). En una plantación promedio se pueden esperar rendimientos de $30 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no aprovechables en la primera clara, $40 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ aprovechables en la segunda clara y $130 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ en la corta final. Es decir un total de $200 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (promedio de $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

La selvicultura habitual de la especie en México entre 1990 y 2005 incluye plantas procedentes de semilla, bajas dosis de fertilización inicial y alta densidad de plantación inicial para maximizar el crecimiento del rodal. Comúnmente se emplea un material vegetal en el que se seleccionaron los árboles madre, pero sin control de progenie. Por esta razón los turnos de corta son de 30 años o superiores. En efecto, las parcelas que se han analizado en este trabajo se instalaron con el objetivo de realizar un manejo extensivo para reducir los gastos de producción y además los propietarios no cuentan con conocimientos y tecnologías para manejarlas alternativamente.

Actualmente se está introduciendo la selvicultura clonal de la especie en México, que va acompañada de un manejo intensivo de las plantaciones, incluso con fertirrigación. En el manejo intensivo los períodos de rotación son de 15 a 25 años para obtener unos 200 pies ha^{-1} en la corta final. Con el cambio de un modelo de largo plazo y de bajo costo a uno intensivo, de plantaciones industriales, con una rotación corta, muchos de los procedimientos tradicionales de manejo se vieron alterados. La preparación del suelo antes de la plantación, los programas de fertilización, claras y podas, entre otros temas, debieron acelerarse para ajustarse al nuevo estilo de manejo (CONAFOR, 2012). Las empresas tales como PROTEAK y SANTA GENOVEVA promueven ese manejo intensivo utilizando plantas muy mejoradas, abonados y fertilizaciones, a veces riego por goteo con el fin de obtener el máximo crecimiento de los árboles y disminuir el turno de corta en Tabasco y en Campeche.

I.2. Herramientas selvícolas utilizadas en teca

I.2.1 Índices de sitio

Para determinar la potencialidad productiva de una masa forestal se emplea a menudo el modelo de índice de sitio. Uno de los factores más importantes que influye en el crecimiento de los árboles es la calidad de estación que se utiliza para indicar la productividad de un sitio para una especie forestal determinada (Vincent, 1980; Clutter *et al.*, 1983; FAO, 1985; 1994). Se basa en variables climáticas, edáficas y de vegetación (Avery y Bukhart, 1983; De los Bueis-Mellado, 2012) y para definirla, generalmente, se usan indicadores intrínsecos al rodal, siendo la altura dominante la variable más adecuada por su baja dependencia con la densidad y con la gestión aplicada, así como por estar estrechamente relacionada con la producción total en volumen (Savill *et al.*, 1997). Así, el desarrollo de distintas curvas que describan la relación altura dominante-edad es un indicador, consistente y útil, que determina las posibles evoluciones en un rodal para una determinada especie (Davis y Johnson, 1987; González-Méndez *et al.*, 2016). Las curvas de índice de sitio para una determinada especie se pueden determinar a partir de tres fuentes de datos diferentes: parcelas temporales, análisis de tronco o parcelas permanentes (Raulier *et al.*, 2003).

Las parcelas temporales permiten utilizar datos de inventarios periódicos y cubrir un área forestal más extensa. Brickell (1968) (citado por Raulier *et al.*, 2003) plantea que las parcelas temporales son una fuente de datos confiable para desarrollar modelos de índice de sitio. Sin embargo, Walters *et al.* (1989) observaron una correlación negativa entre la edad del rodal y el índice de sitio, por lo que disminuye la fiabilidad de esos datos.

Para evitar el sesgo en las parcelas temporales, se ha considerado el análisis de fuste como alternativa. Según Monserud (1984), el análisis de fuste permite un seguimiento del crecimiento y una observación directa de la altura del árbol a una edad índice, lo que posibilita la construcción de curvas de índice de sitio de tipo polimórfico. Cuando se seleccionan árboles dominantes para el análisis de fuste, se asume que estos árboles han sido dominantes o codominantes y lo seguirán siendo (Alemdag, 1991 citado por Raulier *et al.*, 2003). Pero esta hipótesis conlleva cierta incertidumbre porque los árboles dominantes

o codominantes podrían haber sido oprimidos en el transcurso de su desarrollo ya que la clase sociológica de los árboles puede cambiar en el tiempo (Smith, 1984; Schober, 1988). Las parcelas permanentes son la fuente de datos más eficiente (Raulier *et al.*, 2003). Los datos obtenidos de las parcelas permanentes muestran exactamente el patrón de cambio en la altura dominante de un rodal en el tiempo, teniendo en cuenta la dinámica de reposición de árboles dentro del estrato dominante (Raulier *et al.*, 2003).

Por otra parte, según Cluter *et al.* (1983), para la determinación del índice de sitio se utilizan tres métodos, el método de la curva guía, el de la predicción paramétrica o el método de la ecuación en diferencias.

El método de curva guía era la forma más usual de determinar el índice de sitio hace unas décadas, antes del desarrollo de los métodos computarizados (Tomé, 1988; Savill *et al.*, 1997); pero este método incluye elementos de subjetividad que dificultan la realización de pruebas estadísticas sobre la bondad del ajuste de las curvas. Estos problemas han sido superados en la actualidad, al estudiar el índice de sitio mediante modelos matemáticos que evolucionan constantemente.

El método de la predicción paramétrica requiere de datos provenientes de parcelas permanentes o de análisis de tronco. No asume proporcionalidad entre las curvas, por lo que éstas son polimórficas. En este tipo de método hay que asignar el índice de sitio a cada árbol o parcela, se relacionan las estimaciones de los parámetros con los índices de sitio asociados y se reemplaza cada parámetro del modelo original por la función de ajuste correspondiente, con lo cual se pueden calcular las alturas a distintas edades para diferentes índices de sitio.

Los modelos expresados en diferencias finitas son, actualmente, la forma más utilizada para ajustar las ecuaciones de crecimiento en altura ya que permiten el cálculo de la altura media o dominante a cualquier edad basada en la altura media o dominante de cualquier otra edad, consiguiendo así que las alturas sean invariantes respecto a la edad índice (Elfving y Kiviste, 1997). El método en diferencias finitas para desarrollar índice de sitio se describe con más profundidad en Clutter *et al.* (1983) y Torres y Magaña (2001). La principal ventaja del método de diferencias finitas es que permite usar cualquier serie de datos temporales, independientemente de la extensión del periodo de tiempo que comprenda. Esto permite usar mediciones de árboles que aún no han llegado a la edad típica y suprime

la necesidad de establecer una edad de referencia a priori para ajustar los datos (Calama *et al.*, 2003). El parámetro de la ecuación que se elimina determina el comportamiento del modelo: curvas anamórficas o curvas polimórficas. La suposición de que el crecimiento en altura es proporcional en unas y otras calidades da lugar a curvas anamórficas. Cuando no se exige esa condición se obtienen curvas polimórficas.

Las curvas derivadas de los modelos de índice de sitio deben cumplir una serie de propiedades entre las que destacan (Bailey y Clutter, 1974; Cieszewski y Bailey, 2000) el polimorfismo, la pauta de crecimiento sigmoide con un punto de inflexión, la capacidad de alcanzar una asíntota horizontal a edades avanzadas, el tener una respuesta lógica, el ser invariantes con respecto al camino de simulación y con respecto a la edad de referencia y el tener un pequeño número de parámetros.

Las curvas de índices de sitio de esta investigación han sido realizadas sobre principios anamórficos, basados en la hipótesis de que la relación altura-edad para los diferentes sitios presenta una tendencia constante independiente de la edad y que cada índice de sitio tiene su propia asíntota.

La mayor parte de la investigación de índice del sitio por diferencias finitas se centra en especies de pino como *Pinus sylvestris* L. (Palahí *et al.*, 2004), *Pinus pinaster* Ait. (Bravo-Oviedo *et al.*, 2004), *Pinus pinea* L. y *Pinus uncinata* Ram. (Calama *et al.*, 2004) en España y *Pinus durangensis* M. (López y Valles, 2009) y *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Vargas-Larreta *et al.*, 2013) en México. En cuanto a *Tectona grandis*, se han realizado algunos estudios sobre el índice de sitio para esta especie en diferentes países como por ejemplo en Tanzania (Malende y Temu, 1990), en norte de Ghana (Nunifu y Murchison, 1999), en Costa Rica (Bermejo *et al.*, 2004) y en India (Upadhyay *et al.*, 2005). En el Estado de Campeche (México), Camacho *et al.* (2013) construyeron un sistema de curvas anamórficas de índice de sitio para la especie ajustando ecuaciones de crecimiento en altura y diámetro basadas en el modelo de Schumacher de tres parámetros. Tamarit *et al.* (2014) por su parte, ajustaron ecuaciones dinámicas de índice de sitio para *T. grandis* en Campeche y se detectaron tres patrones específicos de crecimiento en los sitios de plantación analizados.

En el Estado de Tabasco, la teca es una de las especies más utilizadas en las plantaciones. Es considerada como una especie adecuada para la producción rápida de grandes

volúmenes de madera, leña y postes y otros productos derivados. Sin embargo, en la actualidad no se ha desarrollado ninguna ecuación para evaluar la capacidad productiva de las plantaciones de teca en dicho Estado.

I.2.2 Sistemas de manejo de densidad

En un rodal sin intervenciones selvícolas la densidad máxima es alcanzada por la evolución natural del rodal y la competencia entre individuos permite el crecimiento de unos a expensas de la muerte de otros. La determinación de la densidad máxima puede ser una herramienta útil para el diseño y la toma de decisiones en selvicultura. Los diagramas de manejo de densidad permiten planificar y describir cuantitativamente las interrelaciones entre producción, densidad y mortalidad en varias etapas del desarrollo del rodal. Estos diagramas describen gráficamente la relación existente entre el área basimétrica, el número de pies por hectárea, la altura dominante, el volumen y el diámetro medio cuadrático, e incluyen una serie de curvas de referencia para diversos niveles de ocupación del sitio. Además, los diagramas permiten vincular dinámicamente alguna de las líneas de referencia selvícolas como la línea o límite de máxima densidad (LMD) y la línea de inicio de competencia (LIC).

Su uso permite describir la situación actual de un rodal y compararlo con condiciones predeterminadas de acuerdo a unos objetivos de gestión previamente especificados (Rogers, 1983; Gezana *et al.*, 2007). Por esto, se les considera una valiosa herramienta que facilita la adecuada planificación y monitoreo de intervenciones selvícolas, maximizando la utilización del sitio mediante un control adecuado de los niveles de competencia del rodal.

Para construir diagramas de manejo de densidad se han utilizado varios índices de densidad a lo largo del tiempo como el índice de densidad del rodal (Reineke, 1933), el índice de separación relativa (RS) (Wilson, 1946; Hernández *et al.*, 2013), la regla de auto-clara (Yoda *et al.*, 1963; Navarro-Cárcamo *et al.*, 2011) o el índice de densidad relativa (Drew y Flewelling, 1979; Chauchard y Dorronsoro, 2013). La gran ventaja de estos índices es que son independientes de la calidad del sitio y de la edad del rodal (Long, 1985; McCarter y Long, 1986).

El primer diagrama de densidad fue desarrollado por Ando (1962) para *Pinus densiflora* Siebold & Zucc en Japón. Desde entonces, se han hecho varias modificaciones y mejoras

incluyendo la sustitución de la producción original, introduciendo ecuaciones de densidad y aplicando diferentes índices de densidad (Mc Carter y Long, 1986; Newton y Weetman, 1993; Newton, 1997; Díaz-Maroto *et al.*, 2010). En Norteamérica, se encuentran los trabajos de Drew y Flewelling (1979) para *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, Flewelling y Drew (1985) para *Pinus contorta* Douglas y McCarter y Long (1986) para *Pseudotsuga douglasiana* Martínez. En Europa, varios autores han publicado sobre el manejo de diagrama de densidad como Valbuena *et al.* (2008) y Castedo-Dorado *et al.* (2009) entre otros. En México, se han construido guías de manejo de la densidad para *Pinus patula* por Becerra (1986), para *Pinus hartwegii* Lindl. por Zepeda y Villareal (1987) y para *Pinus pseudostrobus* Lindl. por Aguirre *et al.* (1994). Para plantaciones de *Tectona grandis* Kumar *et al.* (1995), Jayaraman y Zeide (2007) en la India, Arias (2004) y Perez y Kanninen (2005), en Costa Rica, Madi *et al.* (2020) en Brasil para plantaciones clónales de teca y Tamarit (2013) en México, han propuesto diagramas de densidad.

En el Estado de Tabasco en México, las plantaciones comerciales de teca han aumentado su superficie considerablemente con fines industriales. Sin embargo, no se dispone de suficiente información sobre la gestión de estas masas y en concreto, el Estado de Tabasco está desprovisto de diagramas de manejo de densidad para la teca.

1.2.3 Técnicas de simulación

Los modelos de crecimiento y rendimiento son vitales para la planificación de la gestión forestal. Por otra parte, la simulación o proyección del estado futuro de rodales individuales es una herramienta para planificar la gestión de los bosques a cualquier nivel. Algunos usos importantes de los modelos de crecimiento y rendimiento incluyen su capacidad de explorar diferentes opciones de gestión y alternativas selvícolas, examinar el impacto de la gestión del bosque y las cortas sobre otros valores del bosque o predecir rendimientos futuros, entre otros (Vanclay, 1994).

Estos modelos pueden clasificarse de muchas maneras, pero es útil distinguir entre modelos para predicción y modelos para comprensión (García, 1988; Blanco, 2013). Los últimos, conocidos como modelos de procesos son muy útiles para la investigación básica y se fundamentan en la modelización de los procesos fisiológicos y ecológicos que regulan el crecimiento de los bosques y sus interrelaciones con el medio ambiente. Por otro lado, los

modelos predictivos tienen el propósito de generar información destinada a apoyar la toma de decisiones en la gestión forestal. Las aplicaciones de estos modelos van desde la predicción del crecimiento de masas forestales como la respuesta a la aplicación de regímenes selvícolas (espaciamiento inicial, claras, podas, fertilización, etc.) hasta el apoyo para la planificación de la gestión durante varios turnos de corta. Los modelos de simulación han sido usados ampliamente para predecir la dinámica forestal (Hartshorn, 1975; Hamilton, 1990; Vanclay, 1995; Ramírez-Angulo *et al.*, 2006), estudiar el funcionamiento del bosque como sistema (Botkin, 1993; Salas *et al.*, 2016), predecir el volumen y la biomasa (Torres *et al.*, 2020), analizar y mejorar las simulaciones de dinámica molecular de plantas (Wang *et al.*, 2020), utilizar un enfoque metaheurístico para optimizar la planificación de cortas en plantaciones forestales (Quintero-Méndez y Jerez-Rico, 2017), evaluar la gestión forestal (Howard y Valero, 1992; Bollandas *et al.*, 2008), y los cambios clima-vegetación (Shugart y Smith, 1992; Crookston *et al.*, 2010).

En las últimas décadas, se han desarrollado programas orientados a la simulación de los ecosistemas forestales, por ejemplo, el programa B-Splines para eucaliptales (Cornillon *et al.*, 2003), el programa Cubica v1.2 para choperas (Rodríguez, 2005), GESMO (González-González *et al.*, 2005) o PINEA2 v1.0 (Madrigal *et al.*, 2009), entre otros. En bosques tropicales, la aplicación de modelos de simulación como herramienta en la investigación forestal ha sido utilizada ampliamente (Vanclay, 1998; Vargas-Larreta *et al.*, 2010), aunque presenta dificultades por su complejidad, tanto en términos de número de especies arbóreas como en su biología funcional, presentando muchas diferencias tanto en forma de crecimiento como en requerimientos de condiciones ambientales y patrones de reproducción (Field y Vásquez, 1993), inclusive en plantaciones y sistemas agroforestales (Ugalde, 1988, Hernández *et al.*, 2009).

En plantaciones de teca se han realizado simulaciones como por ejemplo la de Jerez *et al.* (2015) que analizaron el crecimiento de las plantaciones de teca en Venezuela. Ellos implementaron el simulador SIMILE v. 6.0 con un lenguaje declarativo-visual. Por otra parte, Quintero-Méndez y Jerez-Rico (2017) utilizaron otro simulador basado en algoritmos genéticos (Simulador de crecimiento y secuestro de carbono para plantaciones de teca en Venezuela) a partir de ecuaciones diferenciales para comprobar un modelo heurístico de planificación forestal. El objetivo era optimizar la producción de madera y el secuestro de

carbono en plantaciones de teca minimizando el tiempo de corta. Los modelos de crecimiento y producción son también importantes en sistemas agrosilvopastorales, y se pueden usar para determinar el crecimiento y rendimiento en cercas vivas que son árboles utilizados en curvas de nivel, en lindes entre pastizales y tienen como funciones reducir la velocidad de escorrentía, evitar la erosión del suelo y proporcionar alimentos para el ganado. De hecho, Cañadas *et al.*, (2018) desarrollaron un modelo de volumen y rendimiento para tecas cultivadas como cercas vivas en sistemas silvopastorales. En Tailandia, Auykim *et al.*, (2017) estudiaron el crecimiento de la teca regenerada en matorrales y por siembra de tocones en plantaciones de Mae Mho. También, Tewari y Singh (2017) ajustaron un modelo basado en el tiempo, para simular plantaciones de teca en la zona de Gujarat (India).

SiManFor (Bravo *et al.*, 2018) es una aplicación web (www.simanfor.es) desarrollada para facilitar la simulación de alternativas de gestión forestal sostenible, en la que se pueden emplear modelos de crecimiento y producción, tanto modelos desarrollados a nivel de árbol como a nivel de rodal. Los escenarios selvícolas simulados con SiManFor presentan un resumen a modo de tabla de producción en el que se pueden observar las variables de masa en las condiciones antes de la clara, la masa extraída, masa principal después de la clara, masa muerta y la masa incorporada.

En el ámbito internacional, los modelos de simulación del crecimiento y rendimiento, han alcanzado un enorme desarrollo y hoy día esta herramienta es imprescindible no solo para la toma de decisiones en la gestión de bosques naturales y plantaciones (Blanco y González, 2010), sino también para guiar la fijación de las políticas forestales en muchos países (García, 1990; Blanco, 2012). De hecho, resulta imprescindible realizar una simulación para la especie en el Estado de Tabasco (México) con el fin de manejar adecuadamente las plantaciones de teca.

Las tres herramientas selvícolas utilizadas en el presente trabajo pretenden ofrecer pautas para gestionar las plantaciones actuales con criterios de racionalidad, al permitir predecir el desarrollo de los árboles o de los rodales y, facilitar la selección de las mejores alternativas de gestión en función de unos objetivos fijados de antemano, anticipándose a las consecuencias que una determinada acción puede tener sobre las plantaciones de teca en Tabasco.

I.3. Objetivo

El objetivo de esta tesis es desarrollar herramientas científico técnicas de gestión para las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f) en el Estado de Tabasco (México) que permitan cuantificar su potencial productivo y conocer la mejor gestión a aplicar en ellas.

Este objetivo general se concreta en tres objetivos específicos.

- Determinar el índice de sitio para la teca en Tabasco (México) para determinar la calidad de estación conocer la relación que tiene el crecimiento de la teca con respecto al sitio de establecimiento y construir curvas de calidad para la especie.
- Desarrollar un diagrama de manejo de densidad basado en el índice de Reineke para las plantaciones de teca que permitirá maximizar la utilización del sitio mediante un control adecuado de los niveles de competencia del rodal y además proponer diferentes tipos de regímenes de manejo alternativos para que los gestores tengan una herramienta potente en la toma de decisiones.
- Presentar un modelo de simulación selvícola que permita analizar la selvicultura de la especie proponiendo una norma de selvicultura recomendada para las plantaciones de *Tectona grandis* en el Estado de Tabasco.

II. Materiales y Métodos

II.1 Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el Estado de Tabasco, México (Figura 2.1). Tabasco se encuentra localizado entre los 18°39'N, al norte y 17°15'N al sur; 91°00'W al este, y 94°17'W al oeste. La temperatura media anual es de 26°C. La precipitación media anual en el Estado es de 2 550 mm anuales y la total anual puede llegar a hasta 4 000 mm en las zonas más lluviosas. Tabasco presenta las siguientes formaciones boscosas: Selva alta perennifolia, Selva mediana perennifolia, Selva baja caducifolia, Selva baja inundable (canacohital), Bosques de tinto, Bosque de galería, Popales, Tulares y Carrizales (INEGI, 2005). En cuanto a los suelos, existen varios tipos de suelos, siendo los Vertisoles, Regosoles, Solonchaks, Gleysoles, Cambisoles, Fluvisoles, Rendzinas y Acrisoles (INEGI, 2010) los de mayor extensión. En cuanto a los recursos hídricos, Tabasco posee dos de los más importantes ríos a nivel nacional, el Mezcalapa-Grijalva y el Usumacinta y, además, se considera que aproximadamente el 30 % de las aguas superficiales que discurren por México lo hacen por este Estado.

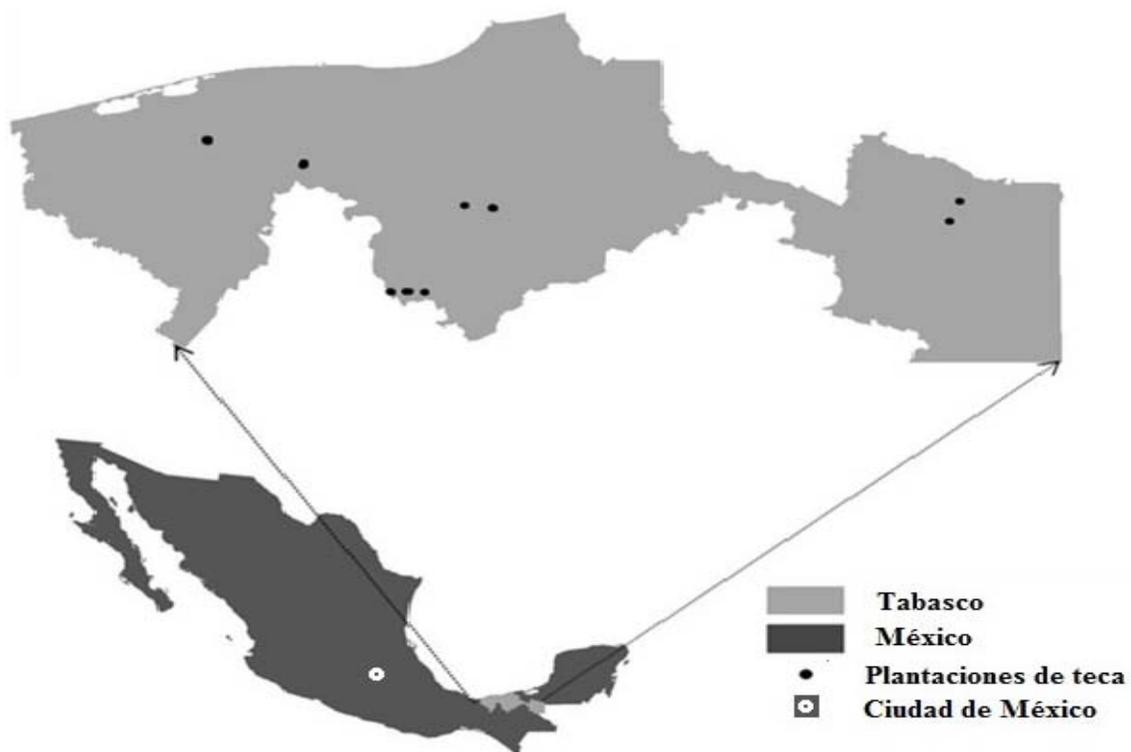


Figura 2.1. Localización de plantaciones de *Tectona grandis* L.f. en el Estado de Tabasco, México

II.2 Plantaciones estudiadas

Se estudiaron un total de 10 plantaciones de teca en las zonas denominadas Rancho Hawai I, Rancho La Reforma, Falcon 1000, Falcon 300, Bocanegra, Rancho San Agustín, Rancho Bellavista, C-16.1, C.16.2 y Santandreu.

Las 10 plantaciones objeto de estudio se caracterizaban por presentar un amplio rango de edad. Las plantaciones más antiguas fueron establecidas en 1994 y las más jóvenes en 1999. En estas plantaciones se establecieron 35 parcelas permanentes en las que se midieron 2039 árboles en la primera medición. En total, se realizaron 7260 mediciones durante los meses de marzo, abril, junio, septiembre, octubre en los años 2003, 2004, 2005 y 2006. En cada árbol se midió el diámetro normal (dbh) con forcípula y la altura total (ht) con pistola Haga. La densidad de las parcelas varió debido al diferente marco de plantación, que definía un rango de espacio entre árboles desde 5,8 a 30 m². Sin embargo, en la mayoría de las parcelas las mediciones fueron realizadas en parcelas de 100 árboles para un espaciamiento de 16 m² lo que representa un total 625 árboles ha⁻¹ (Figura 2.2). Las principales características de las parcelas permanentes utilizadas en los distintos trabajos se muestran en la tabla 2.1.



Figura 2.2. Plantación de teca en Tabasco

Así, en el trabajo de índice de sitio se utilizaron los pares de datos de alturas y diámetros de todas las parcelas de todos los años de medición (2003 a 2006), utilizando un total de 7260 mediciones (Tabla 2.1). Por otro lado, para el trabajo del diagrama de densidad se utilizaron los datos de alturas y diámetros de cada parcela solamente del último año de medición (2006). Debido a que en este año se contaba con siete parcelas adicionales, se optó por incluirlas en el análisis, ampliando el rango de edades y dando mayor representatividad a la muestra. Así, para este trabajo se contó con un total de 42 parcelas y de 2127 mediciones. Finalmente, en el trabajo de simulación, para el que se necesitaban datos de distintas mediciones, se utilizaron los datos de alturas y diámetros desde el año 2003 al año 2006 de las 35 parcelas. Se calcularon las principales variables dasométricas (diámetro medio, diámetro dominante y altura media), mostradas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Resumen de datos de los árboles de las parcelas utilizados en los tres trabajos de esta tesis

Trabajo	Años	Árboles medidos	n mediciones	N parcelas	Estadístico	Datos			
						dbh (cm)	h _t (m)	D _{dom} (cm)	t
(I) Índice de sitio y (III) Simulación	2003- 2006	2039	7260	35	Media	18,2	14,4	25,0	7,6
					std	3,0	1,3	2,2	2,5
					Mínimo	2,0	2,0	10,6	2,7
					Máximo	42,0	29,0	34,7	12,4
(II) DMD	2006	2127	2127	42	Media	20,4	16,9		
					std	7,1	4,5		
					Mínimo	41	31		
					Máximo	2	2		

Nota: dbh: diámetro normal (cm); h_t: altura total del árbol (m); D_{dom}: diámetro dominante (cm); t: edad; DMD: diagrama de manejo de densidad; std: desviación típica

II.3 Procedimientos estadísticos

II.3.1 Índice de sitio

II.3.1.1 Relación altura-diámetro

En primer lugar, los datos se analizaron para eliminar posibles errores hasta conseguir una base depurada de pares altura-diámetro. Posteriormente, se procedió al ajuste de la relación altura diámetro (h-d). Para ello se probaron un total de 21 modelos (Tabla 2.2) en cada plantación.

Tabla 2.2. Modelos h-d ajustados

Modelo	Ecuación	Ecuación
Stage (1975)	$h = \beta_0 d^{\beta_1}$	1
Meyer (1940)	$h = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 d)}]$	2
Bates y Watts (1980)	$h = \frac{\beta_0 d}{\beta_1 + d}$	3
Vanclay (1995)	$\frac{1}{h} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{d}\right)$	4
Curtis (1967)	$h = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	5
Curtis II (1967)	$h = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{d} + \beta_2 d^2$	6
Prodan (1965)	$\log(h) = \beta_0 + \beta_1 \log(d)$	7
Huang y Titus (1992)	$h = \frac{d^2}{(\beta_0 + \beta_1 d)^2}$	8
Sibbesen (1981)	$h = \beta_0 d^{\beta_1 d^{-\beta_2}}$	9
Curtis <i>et al</i> (1981)	$h = e^{\beta_0 + \beta_1 d^{\beta_2}}$	10
Tang (1994)	$h = \beta_0 + \left(\frac{\beta_1}{d + \beta_2}\right)$	11
Huang y Titus II (1992)	$h = \beta_0 e^{-\beta_1 e^{(-\beta_2 d)}}$	12
Seber y Wild I (1989)	$h = \beta_0 e^{-e^{(-\beta_1 (d - \beta_2))}}$	13
Ratkowsky y Reedy (1986)	$h = \left(\frac{\beta_0}{1 + \beta_1^{-1} d^{-\beta_2}}\right)$	14
Weillbull y Bailey (1979)	$h = \beta_0 (1 - e^{(-\beta_1 d)^{\beta_2}})$	15
Chapman y Richards (1959)	$h = \beta_0 (1 - e^{(\beta_1 d)^{\beta_2}})$	16
Zeide (1992)	$h = \beta_0 e^{(-\beta_1 e^{(-\beta_2 d^{\beta_3})})}$	17
Richards (1959)	$h = \beta_0 (1 - e^{\beta_1 d})^{\beta_2}$	18
Bailey (1979)	$h = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 d^{\beta_2}})$	19
Seber y Wild II (1989)	$h = \left(\frac{\beta_0}{1 + e^{-\beta_1 (d - \beta_2)}}\right)$	20
Seber y Wild III (1989)	$h = \beta_0 \left(1 - e^{(-\beta_1 (d - \beta_2)^{\beta_3})}\right)$	21

Nota: h: altura medida, d: diámetro normal observado, β_i : parámetros de la regresión

El ajuste se llevó a cabo mediante la aplicación del procedimiento MODEL de SAS/STAT® (SAS INSTITUTE INC., 2012), utilizando el algoritmo de *Marquardt*. Los parámetros iniciales para el ajuste fueron aquellos empleados por los respectivos autores en sus correspondientes trabajos.

Una vez ajustados los modelos altura-diámetro para cada una de las 10 plantaciones se eligieron los que presentaron los mejores valores de los estadísticos R^2 (coeficiente de determinación), $R^2_{adjpond}$ (Coeficiente de determinación ajustado ponderado) y MSE (cuadrado medio del error) en cada plantación (Tabla 2.3). Con la expresión del modelo elegido para cada plantación se calcularon los valores de las alturas dominantes estimadas de Assmann (1970) a partir de los datos de los diámetros dominantes. La altura dominante se calculó mediante la definición de Assmann (1970).

II.3.1.2 Modelos de índice de sitio

Se seleccionaron 5 ecuaciones en diferencias finitas (Tabla 2.4) como funciones candidatas para ajustar el modelo de crecimiento en altura dominante. Cuatro de ellas se basan en el planteamiento de funciones de crecimiento, y una, la de McDill-Amateis, se plantea directamente como ecuación en diferencias finitas:

- 1) La función de Schumacher (Schumacher, 1939) ha sido utilizada para determinar curvas de índice de sitio a partir del método curva guía (Clutter *et al.*, 1983), pero puede ser transformada para obtener curvas polimórficas. Da lugar a dos ecuaciones dependiendo del parámetro que se ajuste Eq. [34 y 35].
- 2) La función de McDill Amateis (McDill y Amateis, 1992) Eq. [36] no tiene forma integral y directamente se expresa como una ecuación en diferencias finitas.
- 3) La ecuación de Richards (Richards, 1959) Eq. [37] ha sido ampliamente utilizada para determinar las funciones de crecimiento en el ámbito forestal (Rojo y Montero, 1996; Amaro *et al.*, 1998).
- 4) La ecuación de Sloboda (Sloboda, 1971) Eq. [38] es estrictamente creciente y tiene una característica peculiar que es que la función no es lineal en los parámetros (Kiviste *et al.*, 2002).

Todas estas funciones candidatas tienen la propiedad de que las predicciones son invariantes en el tiempo, lo que significa que las proyecciones en un mismo periodo de

tiempo son equivalentes, sin tener en cuenta la longitud del periodo o el número de intervalos de proyección (Palahí *et al.*, 2004).

Tabla 2.3. Parámetros estadísticos utilizados en la evaluación y validación de los modelos

Parámetro estadístico	Símbolo	Fórmula	Ecuación	Valor ideal
Coficiente de determinación	R^2	$\frac{SSC - SCR}{SSC}$	22	1
Coficiente de determinación ajustado ponderado	$R^2_{adjpond}$	$1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1}$	23	1
Suma de los errores al cuadrado	SSE	$\sum_i^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$	24	-
Cuadrado medio del error	MSE	$\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}$	25	-
Media absoluta de residuales	AMRES	$\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \hat{Y}_i }{n}$	26	0
Raíz del error medio cuadrático	RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}}$	27	0
Eficiencia del modelo	EF	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$	28	1
Criterio de información de Akaike	AIC	$AIC = 2pn \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \right)$	29	0-2

Nota: SSC: suma de cuadrados total; SCR: suma de cuadrados medios de los residuales; R^2 : coeficiente de determinación; Y_i : valor observado; \hat{Y}_i : valor estimado con el modelo; \bar{Y} : valor promedio de los valores observados; n: número total de las observaciones; p: número de parámetros en el modelo

II.3.1.2.1 Ajuste del modelo de índice de sitio

Una vez ajustadas las 5 funciones candidatas para cada una de las plantaciones se realizó un análisis comparativo de los estadísticos R^2 , MSE y SSE (suma cuadrado del error) para

elegir la función más adecuada. Para el ajuste de los modelos, se utilizó el 70 % de los datos.

Tabla 2.4. Funciones candidatas para determinar el índice de sitio

Función original	Ecuación	Parámetro libre	Ecuación en diferencia finita	Ecuación
Schumacher(1939)	30			34
$\ln H = a + b \frac{1}{T^c}$		a	$H_2 = H_1 \times e^{\left[b \left(\frac{1}{T_2^c} - \frac{1}{T_1^c} \right) \right]}$	
		b	$H_2 = e^{\left[a + \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^c (\ln(H_1) - a) \right]}$	35
Mc Dill- Amateis (1992)	31	b	$H_2 = \frac{a}{1 - \left(1 - \frac{a}{H_1} \right) \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^c}$	36
$H = \frac{a}{1 + \frac{b}{T^c}}$				
Richards(1959)	32	b	$H_2 = a \left[1 - \left(1 - \left(\frac{H_1}{a} \right)^{\frac{1}{c}} \right)^{\left(\frac{T_2}{T_1} \right)^c} \right]^c$	37
$H = a(1 - e^{-bT})^c$				
Sloboda(1971)	33	b	$H_2 = e^a \left(\frac{H_1}{e^a} \right)^{e^{c(T_1^d - T_2^d)}}$	38
$H = e^{a - be^{-cT^d}}$				

Nota: H₁, H₂ alturas dominantes a la edad T₁ y T₂; a, b, c y d: parámetros de los ajustes de las funciones

II.3.1.2.2 Validación del modelo elegido

Para la validación de los modelos de índice de sitio se seleccionó el 30 % del conjunto de los valores observados de forma aleatoria. Se determinó el coeficiente de determinación (R²) de los modelos, la media absoluta de los residuales (AMRES), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y la eficiencia del modelo (EF) (Huang *et al.*, 2003) para seleccionar el mejor modelo (Tabla 2.3) (Soares *et al.*, 1995; Gadow *et al.*, 2001; Bravo-Oviedo *et al.*, 2004).

II.3.1.2.3 Gráfico de las curvas de índice de sitio

Para definir las calidades de estación se dividió el intervalo entre alturas extremas en 5 rangos y se tomó el valor central de cada rango. De forma general, el rango que se utiliza es

de 2 ó 3 m (Philip, 1994; Hernández-Ramos *et al.*, 2014) y el número de rangos se determina en función de la dispersión de los datos edad-altura dominante#(Martínez-Zurimendi *et al.*, 2015). Se determinaron 5 índices de sitio, utilizando rangos de 3 m y se obtuvieron como valores medios de las calidades 12, 15, 18, 21 y 24 m lo que concuerda con las alturas observadas en la especie.

Las calidades de estación se clasificaron en mala, regular, buena, muy buena y excelente. Se determinaron las curvas del índice de sitio utilizando los valores exactos por los que debía pasar la curva a una edad típica para calcular el índice de sitio. La edad típica fue de 10 años. Así, se tuvo en cuenta que cuando la edad (T_2) era igual a la edad base (edad de cálculo del índice de sitio), la altura dominante (H) era igual al índice de sitio (IS).

Se examinaron visualmente los gráficos de los valores observados frente a los valores predichos y también los gráficos de los residuales frente a los valores predichos de altura dominante y edad. Además, se realizó un gráfico en el que se superpusieron las curvas ajustadas para los distintos índices de sitio (edad-altura dominante) con las trayectorias de las parcelas observadas.

Se realizó un análisis comparativo de las curvas de índice de sitio con aquellas ajustadas por Upadhyay *et al.* (2005) Eq. [39] utilizando la misma metodología. La ecuación polimórfica de Upadhyay *et al.* (2005) fue desarrollada con mucha eficiencia por Elfving y Kiviste (1997).

$$H_2 = \frac{H_1 + d + r}{2 + \frac{4\beta}{T_2^{b_2} (H_1 - d + r)}} \quad \text{Eq. [39]}$$

$$\text{Donde: } d = \frac{\beta}{T_0^{b_2}} \text{ y } r = \sqrt{(H_1 - d)^2 + 4\beta \frac{H_1}{T_1^{b_2}}}$$

$$\beta = 345,217 \text{ y } b_2 = 0,77858$$

Donde: H_1, H_2 alturas dominantes a la edad T_1 y T_2

T_0 : edad base

b_2, β : parámetros estimados

d y r : parámetros calculados de la ecuación

La comparación con el modelo de Upadhyay *et al.* (2005) permitió comparar el potencial productivo de las plantaciones de teca ubicadas en diferentes zonas y analizar el patrón de crecimiento correspondiente a las calidades de estación de diferentes sitios. Por otro lado,

permitió abordar la posibilidad de implementar este modelo, ya aplicado con mucho éxito en otras áreas geográficas.

II.3.2 Diagrama de densidad

II.3.2.1 Cálculo de las variables para las parcelas

Se calcularon las siguientes variables dasométricas para cada parcela: número de pies por hectárea (N), diámetro medio cuadrático (Dg), diámetro medio (m), altura dominante (H, definido como la altura media de los 100 árboles más gruesos por hectárea), volumen total por hectárea (V) y el índice de Reineke (SDI).

El volumen de cada árbol individual (v_i) se calculó mediante la ecuación propuesta por Mora y Gómez (2003) para las plantaciones de teca en Costa Rica Eq. [40].

$$v_i = 0.0000541686 \times d^2 + 0.0000387435 \times d^2 \times h_i - 0.0000244254 \times d \times h_i^2 + 0.000347646 \times h_i^2$$

Eq. [40]

Donde: v_i = volumen del árbol (m^3), d = diámetro (cm) a 1,30m y h_i = altura total del árbol (m).

El índice de Reineke fue calculado utilizando la siguiente expresión Eq. [41]

$$SDI = N \times \left(\frac{Dg}{25} \right)^{1,605}$$

Eq. [41]

Donde: SDI= índice de Reineke, N = número de pies por hectárea, Dg= diámetro medio cuadrático.

Los valores medios, mínimos, máximos y desviación típica de las variables dasométricas de las parcelas estudiadas se muestran en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores medios, mínimos, máximos y desviación típica de las variables dasométricas de las parcelas estudiadas (n=42 parcelas)

	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	V (m ³ ha ⁻¹)	H (m)	SDI
Media	705	22,0	191,2	18,8	497
Desviación típica	411	5,7	79,4	3,7	189
Mínimo	181	9,2	50,2	11,0	195
Máximo	1800	29,9	355,0	26,9	831

Nota: N = número de pies por hectárea; V= volumen por hectárea; Dg= diámetro medio cuadrático; H = altura dominante; SDI= índice de Reineke

II.3.2.2 Análisis estadístico

En primer lugar, se procedió al ajuste simultáneo de las dos ecuaciones no lineales. La primera, que relaciona el diámetro medio cuadrático con la densidad de la masa y la altura dominante Eq. [42] y otra que relaciona el volumen total de la masa con el diámetro medio cuadrático, altura dominante y densidad de la masa Eq. [43]. Las ecuaciones tienen consistencia selvícola y biológica ya que el valor del diámetro medio cuadrático va a estar condicionado por los tratamientos selvícolas realizados (que determinan el número de pies por hectárea) y por la calidad de estación (caracterizada por la altura dominante). Por otro lado, el valor del volumen del rodal está directamente relacionado con el área basimétrica de la masa (cuyo valor depende del número de pies por hectárea y del diámetro medio cuadrático) y con la altura dominante del rodal.

$$D_g = \beta_0 \times N^{\beta_1} \times H^{\beta_2} \quad \text{Eq. [42]}$$

$$V = \beta_3 \times D_g^{\beta_4} \times H^{\beta_5} \times N^{\beta_6} \quad \text{Eq. [43]}$$

Donde:

N = Densidad de masa (pies ha⁻¹).

Dg = Diámetro medio cuadrático de la masa (cm).

H = Altura dominante por parcela (m).

V = Volumen en la parcela (m³ ha⁻¹).

β_i (i = 0 – 6) = Coeficientes de regresión.

El ajuste simultáneo se realizó con el comando MODEL del programa estadístico R-project (SQLDF package) (R-project, 2014) con el que se consiguió obtener la estimación de los parámetros de regresión que componen las ecuaciones y a la vez comprobar la calidad del ajuste mediante sus estadísticos de regresión. Los estadísticos analizados (Tabla 2.3) fueron la suma de cuadrados del error (SSE) y el coeficiente de determinación (R²).

Posteriormente se procedió a la representación gráfica del diagrama de densidad (Barrio-Anta y Álvarez-González, 2005) con las 42 parcelas de estudio. En este trabajo se ha utilizado el índice de densidad propuesto por Reineke (1933). Para determinar la densidad máxima de Reineke se consideraron las densidades máximas de los trabajos realizados en teca en América Latina (Arias 2004, Pérez y Kanninen, 2005, Tamarit, 2013). De hecho, se realizó el promedio de los valores encontrados por estos autores y luego se hizo una propuesta para las plantaciones de teca en Tabasco con el valor de 1000 como máximo alcanzable por el índice de densidad del rodal para la especie en la región.

El diámetro medio cuadrático fue representado en el eje de las abscisas en escala lineal mientras que la densidad (N) fue representada en el eje de las ordenadas en escala logarítmica. Las isolíneas, representando a la altura dominante, el volumen y el índice de densidad de Reineke, se superpusieron en el gráfico. Además, se trazaron las isolíneas de densidad relativa del rodal, que representaron cada una un porcentaje determinado del máximo biológico establecido, incluyendo los límites usualmente recomendados para la gestión de las masas (60 % y 35 %).

Antes de proceder a construir los diagramas de regímenes selvícolas se hizo un diagrama representando las 42 parcelas. Los pares de datos provenientes de estas parcelas fueron diámetro medio cuadrático por parcela (Dg) en el eje de las abscisas y el logaritmo decimal del número de árboles por hectárea por parcela (logN) en el eje de las ordenadas.

Se realizaron dos propuestas con dos alternativas selvícolas de manejo de densidad para la especie aplicando diferentes regímenes de clara hasta llegar a la etapa de madurez de las plantaciones. En la primera propuesta se consideró el promedio de los valores del N (pies ha⁻¹) que han sido utilizados en América Latina para la especie. Este valor está en el rango de 1111 a 880 árboles por hectárea, utilizando el espaciamiento inicial entre arboles (3x3) con un índice de Reineke comprendido entre 600 a 420 en el diagrama. De esta propuesta se diseñó un itinerario selvícola, descrito como una serie de segmentos enlazados dibujados sobre el diagrama y una tabla en la que se describía numéricamente cada una de las actuaciones, cuantificando la situación antes y después de la corta, y su influencia en SDI, Dg, V y N. En los procesos sujetos a evolución natural se describían los crecimientos, y en las cortas se cuantificaban las extracciones. Esta propuesta tuvo como objetivo principal maximizar la producción del rodal completo.

Por otro lado, en la segunda propuesta se tuvo como objetivo fundamental maximizar el crecimiento del árbol individual (maximizar el rendimiento en diámetro). Para ello, se utilizó un espaciamiento que se usa normalmente en México (3,5 m x 3,5 m) ó (4m x 3m), buscando así un total de 816 árboles por hectárea con un índice de Reineke comprendido entre 500 a 350. En la construcción de estos diagramas no se tuvo en cuenta la edad de las parcelas ni la mortalidad natural por lo que la trayectoria de la línea de la evolución del diámetro medio cuadrático y la densidad fue trazada paralela al eje de las abscisas (McCarter y Long, 1986; Dean y Baldwin, 1993; Barrio-Anta *et al.*, 2004).

II.3.3 Simulación selvícola en SiManFor

II.3.3.1 Selección de modelos utilizados en la simulación

Para la selección de los modelos se hizo una minuciosa revisión de literatura científica sobre modelos de crecimiento y producción que se han desarrollado para la especie en diferentes lugares del mundo. Se seleccionaron los más precisos en la estimación de las variables IS (índice de sitio), H (altura dominante), G (área basimétrica) y V (volumen).

II.3.3.1.1 Índice de sitio y crecimiento en altura dominante

Para la determinación del índice de sitio, se eligió el modelo de índice de sitio propuesto por Camacho *et al.* (2013) para plantaciones de teca en el Estado de Campeche (México) que se generó por el ajuste del modelo de Schumacher (1939) Eq. [44], Tabla 2.6. Estos autores ajustaron una curva a cada uno de los tres índices de sitio elegidos (15, 20, 25). El sistema de curvas consideró curvas anamórficas y se tomó como edad base la edad de 23 años.

Para simular la evolución de la altura dominante se empleó la misma metodología que utilizaron Tamarit *et al.* (2014) para construir las curvas de índice de sitio a partir de una ecuación dinámica Eq. [45], Tabla 2.6), tomando como modelo base el modelo generado por Chapman-Richards (Richards, 1959).

II.3.3.1.2 Crecimiento en Área basimétrica y volumen

El modelo que se utilizó para estimar el área basimétrica y el volumen fue desarrollado por Tamarit (2013) para la teca en el sureste de México Eq. [49-52], Tabla 2.6. El sistema de crecimiento en área basimétrica está formado por un modelo de predicción y uno de proyección y se basa en la ecuación de Schumacher (Schumacher, 1939; Kotze, 2003). El sistema de crecimiento en volumen utiliza el mismo enfoque.

Tabla 2.6. Modelos seleccionados para introducir en SiManFor y realizar una simulación selvícola en la especie *Tectona grandis*

Autor	Variable ajustada	Ecuación	Ecuación	Parámetro s	Valor de los parámetros
Camacho <i>et al.</i> (2013)	IS	$H = \frac{IS}{\frac{e^{-\beta_1}}{T_0^{\beta_2}}} * \frac{e^{-\beta_1}}{T^{\beta_2}}$	44	β_1 β_2	-2,07109 0,387128
Tamarit <i>et al.</i> (2014)	H	$H = e^{X_0} * (1 - e^{(-\beta_1 T)})^{\left(\frac{\beta_2}{X_0}\right)}$	45	β_1 β_2	0,12414 2,206382
		$X_0 = 0.5(\ln(Y_0) + R_0)$	46		
		$R_0 = \sqrt{\ln(H)^2 - 4\beta_2 L_0}$	47		
		$L_0 = \ln(1 - e^{(\beta_1 T_1)})$	48		
Tamarit (2013)	V	Modelo de predicción		β_0	0,943286
		$V_1 = \beta_0 G_1^{\beta_1} H_1^{\beta_2} e^{\beta_3 N / T_1}$	49	β_1	1,034274
		Modelo de proyección		β_2	0,636992
		$V_2 = V_1 \frac{G_2^{\beta_1} H_2^{\beta_2} e^{\beta_3 N_2 / T_2}}{G_1^{\beta_1} H_1^{\beta_2} e^{\beta_3 N_1 / T_1}}$	50	β_3	0,00251
Tamarit (2013)	G	Modelo de predicción		β_0	0,65399
		$G_1 = e^{\beta_0} H_1^{\beta_1} e^{(\beta_2 + \beta_3 N_1 + \beta_4 H_1) / T_1}$	51	β_1 β_2	1,278159 -33,6374
		Modelo de proyección		β_3	0,028354
		$G_2 = G_1 \frac{H_2^{\beta_1} e^{(\beta_2 + \beta_3 N_2 + \beta_4 H_2) / T_2}}{H_1^{\beta_1} e^{(\beta_2 + \beta_3 N_1 + \beta_4 H_1) / T_1}}$	52	β_4	-0,51966

Nota: H=altura dominante (m); IS=índice de sitio (m); T= edad del árbol (años); T₀= edad base (23 años); G=área basimétrica (m² ha⁻¹); G₁=área basimétrica a la edad T₁ (m² ha⁻¹); G₂=área basimétrica a la edad T₂ (m² ha⁻¹); V=volumen (m³ ha⁻¹); V₁=volumen a la edad T₁ (m³ ha⁻¹); V₂=volumen a la edad T₂ (m³ ha⁻¹); Y₀= altura inicial (m); H₁= altura a estimar a la edad T₁ (meses); H₂= altura a estimar a la edad T₂(meses); X₀= variable teórica que representa la calidad de estación; R₀= matriz de varianza-covarianza del término de error; L₀= parámetro relacionado con el sitio; N= número de árboles; β_i =parámetros de los modelos

II.3.3.1.3 Proyección de la masa

Una vez programados se definió el escenario selvícola en SiManFor. Éste consistió en una proyección de las variables de masa a una edad t+n meses, donde t es la edad al inicio de la proyección y n es próximo a 12 meses, debido a que las parcelas fueron remedidas cada año consecutivo. El número de meses de la proyección se hizo coincidir con el tiempo transcurrido hasta la medición siguiente de esa misma parcela, tiempo que estaba

comprendido entre 6 y 18 meses. La proyección de la masa se realizó sin mortalidad. El escenario mostró los valores de las variables de masa a la edad t y a la edad $t + n$ meses. Las variables de masa calculadas por la plataforma fueron altura dominante (H), altura media (Hm), número de pies por hectárea (N), diámetro medio cuadrático (Dg), diámetro dominante, diámetro medio (Dm), volumen (V), área basimétrica (G), índice de sitio (IS), índice de Hart-Becking e índice de Reineke (SDI).

II.3.3.1.4 Validación del simulador con los modelos seleccionados

La evaluación cuantitativa de las variables de masa en los procesos de simulación consistió en la comparación de valores observados y predichos. Se realizó el análisis de la validación con los valores observados del siguiente año para que hubiera coincidencia entre la edad de la parcela proyectada y la medida. Los valores observados fueron los del estado de las parcelas en la siguiente medición y los predichos fueron los datos que se obtuvieron después de la proyección en la plataforma. El plazo de simulación se ajustó en cada parcela para que hubiera coincidencia de la edad de la proyección con la edad de la siguiente medición. Además, se seleccionaron las parcelas que tuvieron una supervivencia de $\geq 90 \%$, para que el hecho de no simular la mortalidad ni las claras no interfiriese en la bondad de los resultados de la validación.

Las variables analizadas fueron el volumen por hectárea, altura dominante y el área basimétrica. Los estadísticos calculados fueron (Tabla 2.3) la media absoluta de los residuales (AMRES), la raíz del error medio cuadrático (RMSE), la eficiencia del modelo (EF) y el criterio de información de Akaike (AIC). Además, se examinaron visualmente los gráficos de los valores observados frente a valores predichos y residuales frente a predichos.

II.3.3.1.5 Simulaciones selvícolas para la ilustración de la tabla de producción

Para desarrollar una aplicación práctica del simulador, que sirviese además para discutir los resultados obtenidos de su uso, se presentaron dos ejemplos de parcelas con diferente densidad y se les sometió a dos itinerarios selvícolas. Los resultados obtenidos se presentaron en forma de tabla de producción, que puede utilizarse como referencia para la

selvicultura para la especie y sirven para estimar el crecimiento y la producción maderable de *T. grandis*.

SI MAN I FOR Sistema de Apoyo para la Simulación de Alternativas de Manejo Forestal Sostenible

Ejecutar escenario

Indique los datos requeridos en cada paso para ejecutar el escenario

- 1 Seleccione el inventario sobre el que desea ejecutar el escenario:
 Ver también los inventarios públicos
- 2 Seleccione un modelo contra el que se ejecutará el escenario:
 Usar mi plantilla de resultados
(+) Seleccionar hojas de salida
- 3 Seleccione el nodo del que desea obtener resultados y haga clic en el botón *Obtener resultados*:

↓

Inventario filtrado

↓

Aplicar modelo 48 meses

↓

Corta sistemática del 30% de los árboles

↓

Aplicar modelo 150 meses

↓

Corta sistemática del 20% de los árboles

↓

Aplicar modelo 180 meses

↓

Corta sistemática del 15% de los árboles

Figura 2.3. Ejemplo del primer escenario de este trabajo en SiManFor

SI MANIFOR Sistema de Apoyo para la Simulación de Alternativas de Manejo Forestal Sostenible

Ejecutar escenario

Indique los datos requeridos en cada paso para ejecutar el escenario

- 1 Seleccione el inventario sobre el que desea ejecutar el escenario:
 teca.2003.vol.meses
 Ver también los inventarios públicos
- 2 Seleccione un modelo contra el que se ejecutará el escenario:
 a
 Usar mi plantilla de resultados
(+) Seleccionar hojas de salida
- 3 Seleccione el nodo del que desea obtener resultados y haga clic en el botón *Obtener resultados*:


```

                graph TD
                    A[Inventario filtrado] --> B[Aplicar modelo 48 meses]
                    B --> C[Corta sistemática del 25% de los árboles]
                    C --> D[Aplicar modelo 150 meses]
                    D --> E[Corta sistemática del 20% de los árboles]
                    E --> F[Aplicar modelo 180 meses]
                    F --> G[Corta sistemática del 10% de los árboles]
            
```

Agregar Eliminar Editar Previsualizar resultados Obtener resultados

Figura 2.4. Ejemplo del segundo escenario de este trabajo en SiManFor

Para definir los itinerarios, se establecieron relaciones dendrométricas y una norma de silvicultura para las variables de masa remanente. Se establecieron las variables de masa

extraída como la diferencia entre la densidad prescrita a una altura dominante y el número de pies existente antes del tratamiento.

Se seleccionaron dos parcelas, una de densidad baja y de edad 7,8 años y otra de densidad alta y de 8,2 años, que cumplían todos los requisitos para representar la población e ilustraban el buen comportamiento del modelo. En las dos se realizaron dos simulaciones, cada una con tres intervenciones selvícolas. En la primera simulación el itinerario consistió en tres claras [I: 30 % de peso a la edad de 12 años; II: 20 % de peso a la edad de 25 años; III: 15 % de peso a la edad de 40 años] (Figura 2.3). En la segunda simulación, el itinerario consistió en tres claras [I: 25 % de peso a la edad de 12 años; II: 20 % de peso a la edad de 25 años; III: 10 % de peso a la edad de 40 años] (Figura 2.4). El primer criterio seguido se basó en realizar unas claras más fuertes y el segundo itinerario en claras más débiles. Los dos criterios expresan la norma de selvicultura recomendada para estas plantaciones.

Los esquemas de claras propuestos se analizaron de acuerdo con el criterio de Long (Long *et al.*, 1988; Dean y Baldwin, 1993) manteniendo la plantación entre el 60 % (600) del índice máximo de Reineke (1000) y un mínimo de 35 % (350), rango que permite una ocupación completa del sitio.

III. Resultados

III.1 Índice de sitio

III.1.1 Ajuste de la ecuación h-d

La nube de puntos altura-diámetro (Figura 3.1) utilizados para encontrar el mejor ajuste h-d mostró un buen comportamiento de los pares de datos.

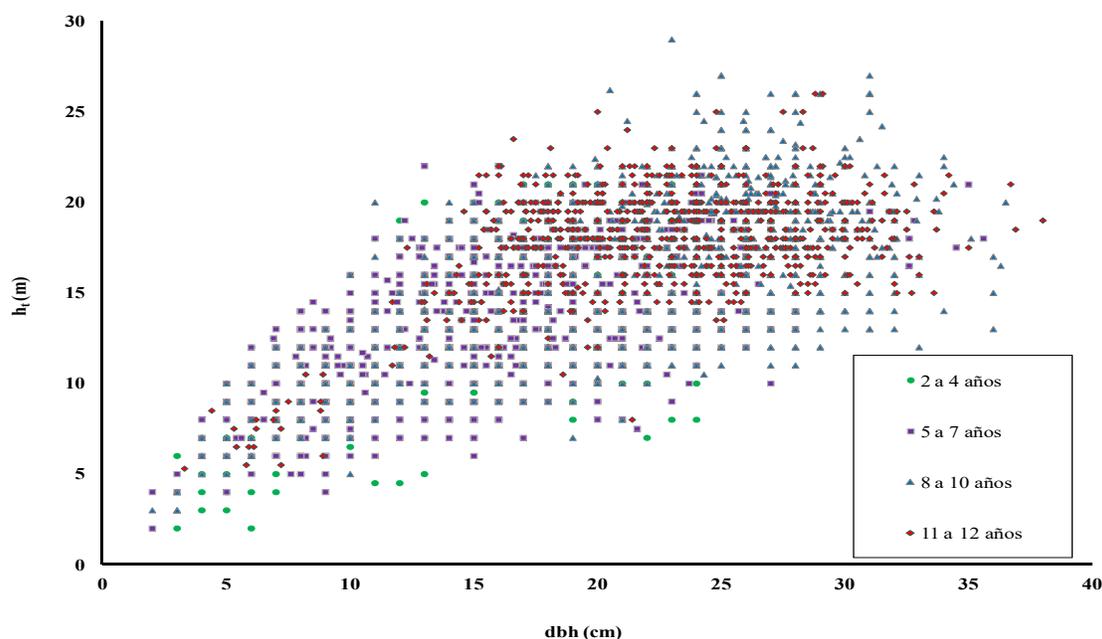


Figura 3.1. Pares de datos altura-diámetro por clase de edad de las diez plantaciones de *Tectona grandis* utilizados en el ajuste de los modelos altura-diámetro.

Nota: ht es la altura normal de cada árbol medido y dbh es el diámetro normal

En la tabla 3.1 se presentan los parámetros estadísticos obtenidos en los mejores ajustes de la relación altura-diámetro en cada plantación. Como se puede observar la mayoría de los modelos tuvieron un bajo valor de coeficiente de determinación (R^2), incluso algunos fueron inferiores a 50 %. El modelo de Huang y Titus I (Fang y Bailey, 1998) tuvo mejor resultado con un coeficiente de determinación de 0,6638 en la plantación 23. Esta situación ocurrió porque la plantación 23 no tiene parcelas jóvenes es decir las parcelas son más viejas del promedio y además hay mayor heterogeneidad de alturas para un mismo diámetro en los árboles de mayor edad. El peor resultado del conjunto fue obtenido en la

plantación 27 con el modelo de Stage (1975) debido a que esta es más variable en calidad del suelo.

Tabla 3.1. Valores de estadísticos de los mejores modelos h-d para cada plantación

Plantación	Modelo	Estimador	Valor del estimador	R ²	R ² _{adj pond}	MSE
8	Huang y Titus II (1992)	b0	24,3348 (1,5160)	0,4208	0,4197	8,0124
		b1	2,8613 (0,3738)			
		b2	0,0867 (0,0125)			
14	Prodan (1965)	b0	0,4131 (0,0452)	0,4708	0,4696	9,7463
		b1	0,2706 (0,0150)			
16	Huang y Titus I (1992)	b0	0,9771 (0,0483)	0,5292	0,5284	4,5654
		b1	0,2253 (0,0184)			
17	Meyer (1940)	b0	20,4229 (0,4607)	0,5858	0,5849	5,6353
		b1	0,0944 (0,0055)			
23	Huang y Titus I (1992)	b0	1,0897 (0,0411)	0,6638	0,6631	2,9459
		b1	0,1757 (0,0021)			
25	Stage (1975)	b0	2,1395 (0,1216)	0,4984	0,4978	4,5593
		b1	0,6969 (0,0231)			
26	Vanclay (1995)	b0	0,0325 (0,0019)	0,5976	0,5969	3,3701
		b1	0,5937 (0,0254)			
27	Stage (1975)	b0	4,6036 (0,2510)	0,2612	0,2608	4,5468
		b1	0,3853 (0,0173)			
29	Stage (1975)	b0	2,0119 (0,1813)	0,5864	0,5849	2,2147
		b1	0,6002 (0,0308)			
46	Meyer (1940)	b0	20,1231 (0,7243)	0,3995	0,3987	8,5861
		b1	0,0831 (0,0071)			

Nota: Los datos entre paréntesis representan el error estándar aproximado; nivel de significación de los parámetros de los modelos $P < 0,0001$; R²: Coeficiente de determinación; R²_{adj pond}: Coeficiente de determinación ajustado ponderado; MSE: cuadrado medio del error

III.1.2 Ajuste de la ecuación índice de sitio

Datos utilizados

Los valores medio, la desviación típica, el valor mínimo y máximo de los datos de altura dominante y edad de las parcelas, utilizados para el ajuste y la validación de modelos de índice de sitio se presentan en la tabla 3.2.

Tablas 3.2. Características dasométricas de las parcelas utilizadas en el ajuste (n=25 parcelas) y validación (n=10 parcelas) de los modelos de índice de sitio para *Tectona grandis*

	Ajuste		Validación		
	T (años)	H (m)	T (años)	H (m)	
Media	8,9	17,0	Media	8,2	17,2
Desviación típica	2,0	2,1	Desviación típica	2,0	2,2
Mínimo	3,6	11,1	Mínimo	2,7	11,6
Máximo	12,4	22,4	Máximo	12,4	22,5

Nota: H: altura dominante de Assmann (m); T: edad (años)

En la tabla 3.3 se muestran los resultados del ajuste de las 5 funciones candidatas para obtener el modelo de índice de sitio. Como se puede observar, el modelo que presentó los mejores resultados para el índice de sitio fue la función no lineal derivada de la ecuación de Sloboda (1971) con un parámetro libre b, según criterios biológicos. Las funciones de Shumacher (1939) y de Richards (1959) fueron las que presentaron valores más elevados en la suma cuadrado del error (SSE) y en el cuadrado medio del error (MSE). Los valores entre paréntesis representaron los errores. El mayor error estándar en los parámetros (mostrado entre paréntesis), se observó en la función de Schumacher (1939), seguida por la de McDill-Amateis (1992).

Tabla 3.3. Resultados de los ajustes de los modelos de índice de sitio para *Tectona grandis*

	Parámetro estimado				SSE	MSE	R ²
	a	b	c	d			
Schumacher (1939)	-	-4,0126 (17,4330)	-0,0593 (0,2307)	-	17,8725	0,2628	0,9964
Schumacher F10 (1939)	3,7185 (0,4857)	-	0,2985 (0,1597)	-	16,9822	0,2497	0,9984
McDill- Amateis (1992)	33,2296 (9,4645)	-	0,5471 (0,1620)	-	17,1054	0,2515	0,9983
Richards (1959)	24,8918 (2,8775)	-	0,3348 (0,0542)	-	17,3270	0,2548	0,9983
Sloboda (1971)	3,5941 (0,4069)	-	1,0738 (1,6663)	0,2137 (0,2600)	16,7740	0,2504	0,9984

Nota: Nivel de significación de los parámetros de los modelos $P < 0,0001$; SSE: suma cuadrado del error; MSE: cuadrado medio del error; R²: coeficiente de determinación; Los datos entre paréntesis representan el error estándar aproximado

III.1.3 Validación de la ecuación índice de sitio

En la tabla 3.4 se muestran los parámetros de validación de los modelos probados. Se pudo observar que todos los modelos presentaron buenos resultados.

Tabla 3.4. Resultados de la validación de los modelos del índice de sitio

	R ²	AMRES	RMSE	EF
Schumacher (1939)	0,9964	0,0155	0,0913	0,9236
Schumacher F10(1939)	0,9984	-0,1713	0,6419	0,9384
McDill-Amateis (1992)	0,9983	0,0148	0,0868	0,9374
Richards (1959)	0,9983	0,0146	0,6628	0,9343
Sloboda (1971)	0,9984	0,0137	0,0803	0,9377

Nota: R²: coeficiente de determinación; AMRES: media absoluta de residuales; RMSE: raíz del error medio cuadrático; EF: eficiencia

Considerando los resultados del ajuste y los de validación, se eligió el modelo de Sloboda (1971) porque presentó los menores valores de AMRES y RMSE (Tabla 3.4). Por otra parte, en el modelo seleccionado, el valor del cuadrado medio del error (MSE) fue bajo (Tabla 3.3), por lo que el modelo ofreció una adecuada precisión en las predicciones. Además, otro de los elementos que jugó un papel fundamental en la decisión fue la bondad de ajuste del modelo a través del coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9984$).

El análisis gráfico de los valores observados frente a los predichos de las alturas dominantes (Figura 3.2) y los residuales frente a los predichos y observados de las alturas dominantes y la edad (Figura 3.3) mostraron la exactitud y precisión del modelo seleccionado. En la figura 3.2 se observó que el modelo fue bastante preciso, no habiendo heterocedasticidad ni presencia de valores atípicos en el gráfico. Lo anterior, añadido a un fuerte coeficiente de determinación confirmó el hecho de que la media absoluta de residuales ($AMRES = 0,0137$) fue relativamente baja y que presentó una distribución normal del error.

La función diferencial de Sloboda (1971) presentó los mejores resultados en el ajuste y en la validación. Realizando nuevamente el ajuste con todos los datos, la Eq. [53] fue la expresión definitiva para el índice de sitio, ecuación con la que se procedió a desarrollar las curvas de calidad.

$$H_2 = e^{3.3747} \left(\frac{H_1}{e^{3.3747}} \right)^{e^{2.5494(T_1^{0.1529} - T_2^{0.1529})}} \quad \text{Eq. [53]}$$

Donde: H_1 =altura dominante a la edad T_1 ; H_2 = altura dominante a la edad T_2 .

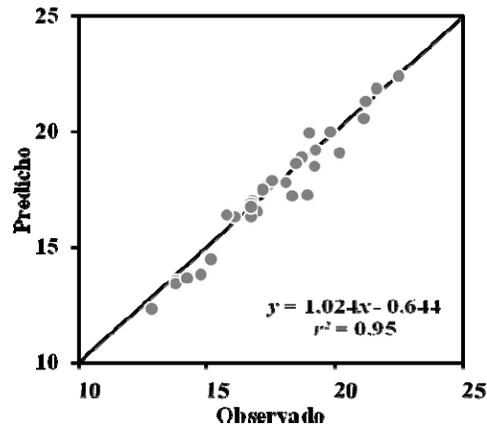


Figura 3.2. Observados vs predichos (altura dominante) del modelo de Sloboda (1971)

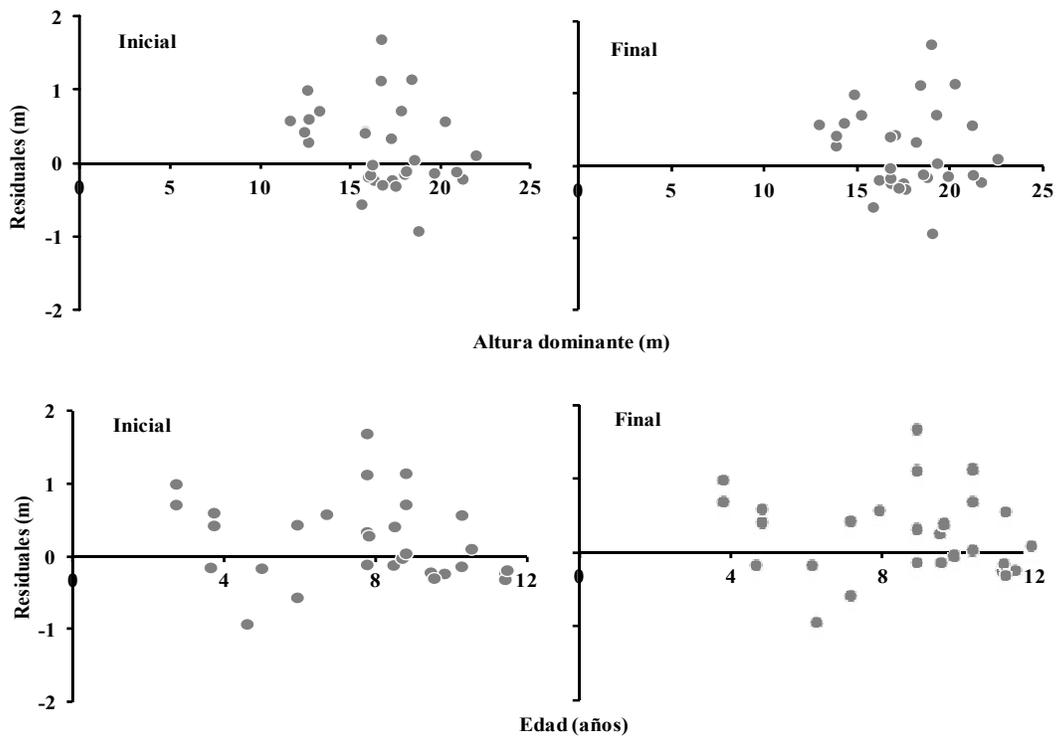


Figura 3.3. Residuales frente a la altura dominante y la edad, momento inicial y final del modelo de Sloboda (1971).
Nota: Inicial: altura dominante 1 a la edad T_1 , Final: altura dominante 2 a la edad T_2

III.1.4 Representación de las curvas de calidad

Los valores por los que debieran pasar las curvas a la edad típica de 10 años fueron 11,4 m el extremo inferior y 25,2 m el extremo superior. La representación gráfica de la función de Sloboda (1971) (Figura 3.4) forzada a pasar por los pares de datos (10, 12), (10, 15), (10, 18), (10, 21), (10, 24) determinó las curvas de crecimiento de las plantaciones de teca estudiadas en el Estado de Tabasco, indicativas de las respectivas calidades de estación.

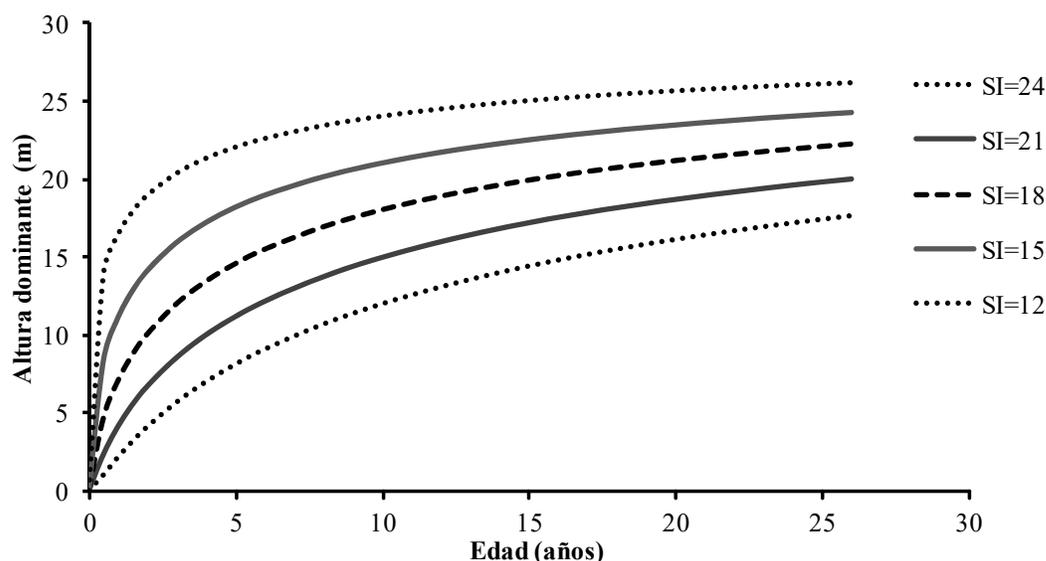


Figura 3.4. Curvas de calidad de estación para *Tectona grandis* L.f. en Tabasco según la ecuación de Sloboda (1971).
Nota: Edad típica: 10 años, SI: índice de sitio

III.1.5 Comparación con la ecuación de crecimiento desarrollada por Upadhyay

La Figura 3.5 permitió comparar los hábitos de crecimiento en altura desde las mejores localidades hasta las más pobres de cada área geográfica. Esta comparación se hizo para una edad determinada y también para contrastar la capacidad productiva de los mejores sitios de cada región. El resultado de la función de crecimiento desarrollada por Upadhyay *et al.* (2005) Eq. [39], aplicada a los mismos índices de sitio y la edad base del presente trabajo tomó la forma presentada en la Eq. [54].

$$H_2 = \frac{H_1 + 57,4794 + r}{2 + \frac{1380,86}{T_2^{0,7786}(H_1 - 57,4794 + r)}} \quad \text{Eq. [54]}$$

$$r = \sqrt{(H_1 - 57,4794)^2 + 1380,86 \frac{H_1}{T_1^{0,7786}}}$$

Donde: H_1 es la altura dominante a la edad base de diez años.

Con los IS 12, 15, 18, 21 y 24 se desarrolló la comparación gráfica entre la ecuación de Sloboda y el modelo desarrollado por Upadhyay *et al.* (2005) en la Figura 3.5.

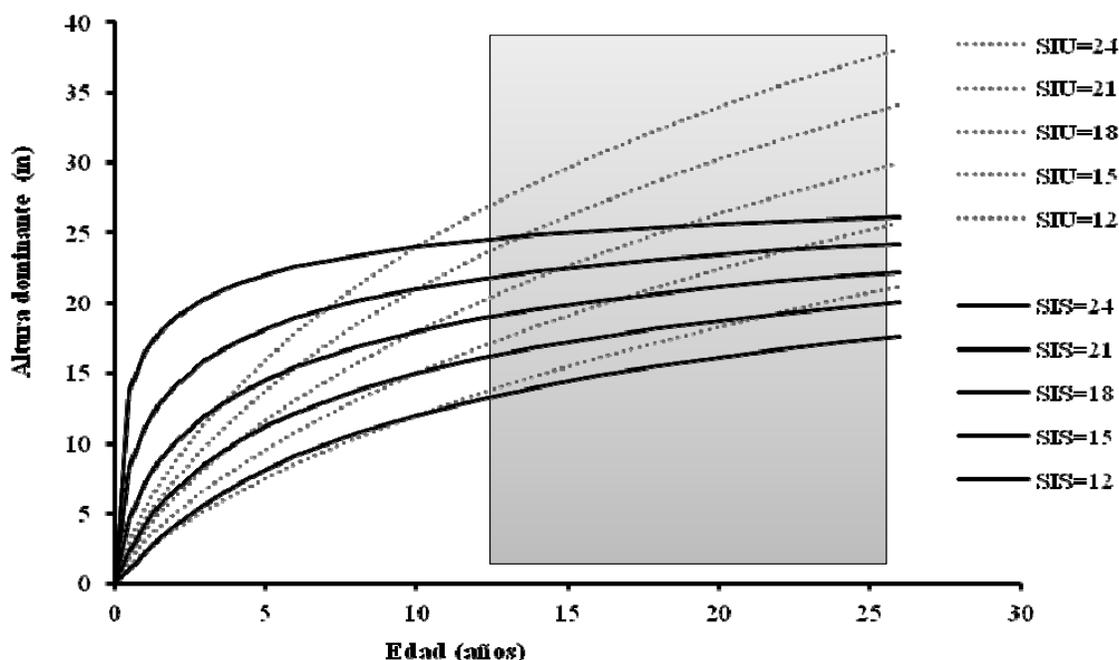


Figura 3.5. Comparación de la evolución de las curvas de índice de Sloboda (1971) [línea sólida] para índices de sitio de 12, 15, 18, 21 y 24 m a una edad de referencia de 10 años, frente a las curvas desarrolladas por Upadhyay *et al.* (2005), [líneas punteadas] utilizando el modelo de Hosfeldt IV (Kiviste *et al.*, 2002) para 150 parcelas permanentes de todas las plantaciones de teca en la India, SIU: índice de sitio de Upadhyay y SIS: índice de sitio de Sloboda (el sombreado gris representa las zonas en que los valores de altura dominante y edad son una extrapolación).

El modelo de Sloboda se ajustó mejor a los datos en edades inferiores a la edad base en comparación con las curvas producidas por Upadhyay *et al.* (2005). Este resultado pone en relieve que en la evolución precoz de las parcelas el índice de sitio repercute en unas variaciones mayores en la altura dominante. Sin embargo, para edades mayores a la edad base, las curvas de Upadhyay Eq. [54] tendieron a sobreestimar la altura dominante con respecto al modelo de Sloboda. La evolución en altura dominante de las parcelas, según el modelo desarrollado en este trabajo, se aproximó a una asíntota a edades más tempranas en comparación con las curvas de Upadhyay, mientras que la evolución de la altura dominante

según los modelos de Upadhyay fue siempre creciente y no se apreció que llegara a una situación asintótica.

III.2 Diagrama de densidad

III.2.1 Ajuste simultáneo de las ecuaciones que configuran el diagrama de densidad

En la tabla 3.5 se presentan los resultados del ajuste simultáneo de las ecuaciones necesarias para el diagrama de densidad. Los parámetros SSE y R^2 presentaron valores aceptables para el ajuste simultáneo. Por otra parte, se pudo observar que el valor de R^2 fue mayor para el volumen. Todos los valores de los estimadores fueron significativos a nivel 5 %.

Tabla 3.5. Resultados de los ajustes de los modelos para *Tectona grandis*

	Eq. $D_g = \beta_0 * N^{\beta_1} * H^{\beta_2}$					Eq. $V = \beta_3 * D_g^{\beta_4} * H^{\beta_5} * N^{\beta_6}$					
	β_0	β_1	β_2	SSE	R^2	β_3	β_4	β_5	β_6	SSE	R^2
Estimador	22,5097	0,3010	0,6432	2957	0,7785	0,0004926	1,6307	0,6976	0,9009	127595	0,9506
Error	8,4916	0,0338	0,1078			0,0003068	0,1351	0,1008	0,0501		

Nota: SSE: suma cuadrado del error; R2 coeficiente determinación

III.2.2 Representación del diagrama de densidad

En la figura 3.6 se muestra el diagrama de manejo de densidad desarrollado donde se han superpuesto las líneas de la altura dominante, el volumen y el índice de densidad de Reineke. Los valores de altura dominante representados oscilaron entre 13 y 37 m y los de diámetro medio cuadrático entre los 9 y 45 cm. La pendiente ascendente de isolíneas de izquierda a derecha indicó que la altura dominante de la teca fue muy sensible a la densidad de la masa. Por otra parte, el eje de densidad abarcó entre 50 y 2000 pies ha^{-1} , en escala logarítmica. Las curvas representadas del volumen variaron desde 50 a 500 $m^3 ha^{-1}$, las curvas del índice de Reineke desde 100 a 1000 y la pendiente descendente de isolíneas de izquierda a derecha se vio afectada en cualquier punto en el tiempo por la altura dominante de acuerdo al principio de la productividad.

Así, con el desarrollo de este diagrama se pueden conocer las variables del rodal en cualquier situación. Si se conocen los valores de densidad (pies ha^{-1}) y diámetro medio cuadrático de una masa (cm), situando ese punto en el diagrama y siguiendo las isolíneas

más próximas, se obtienen los valores de altura dominante, volumen de masa e índice de Reineke. Así, a partir de dos variables conocidas, se pudo obtener el resto de variables de una masa. Además, si se parte de la altura dominante y la densidad, mediante la intersección se determinan el diámetro medio cuadrático, el volumen de masa y el índice de Reineke.

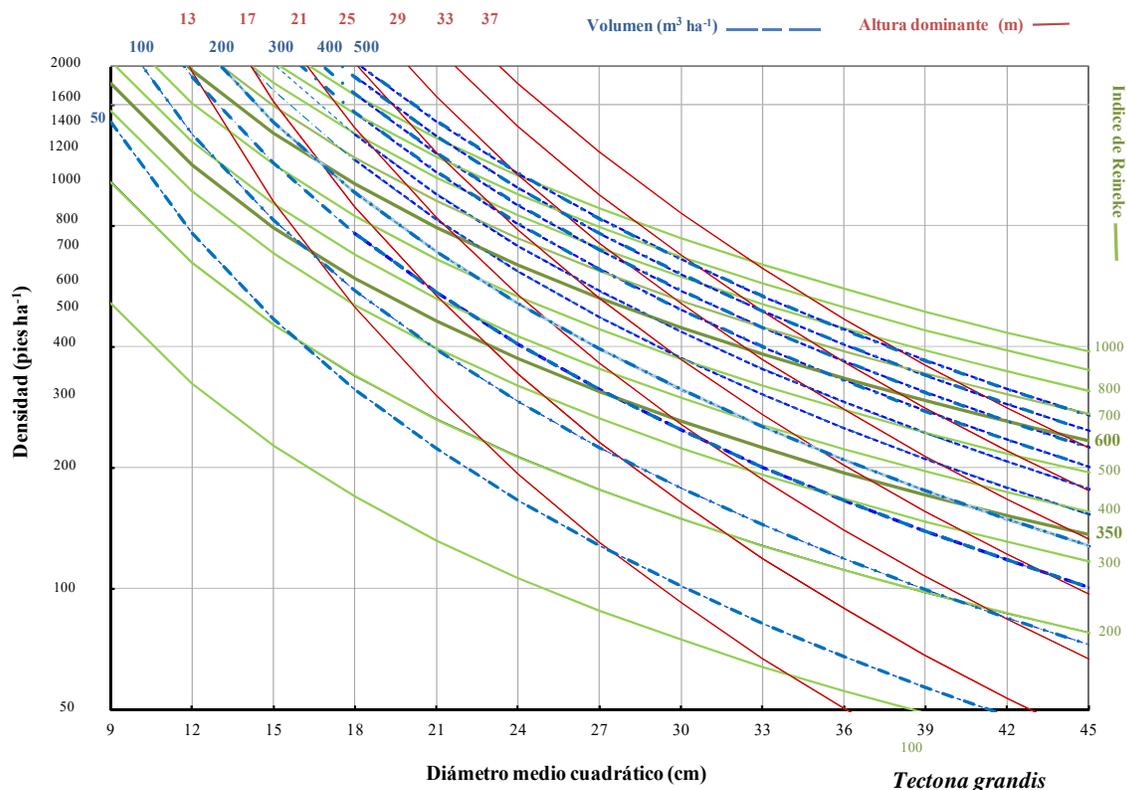


Figura 3.6. Diagrama de densidad para *T. grandis* en Tabasco

En la figura 3.7 se presentan los datos de las variables D_g y $\log N$ provenientes de las 42 parcelas de teca instaladas en Tabasco. En ella, se puede observar la proporción relativa de las parcelas según la banda en la que se encuentran. Aquellos puntos que se localizaron por encima del límite del 60 % del índice de Reineke fueron las parcelas que deberían haber sido aclaradas hace tiempo. Fueron un total de 14 (representadas en símbolo cuadrado) y representaron el 33,3 % de las 42 parcelas. Las que se ubicaron en la banda entre el 35 y 60 % representaron las parcelas que deberían ser aclaradas en el momento actual. Fueron 16 parcelas (símbolo triángulo) que representaron el 38,1 %, mientras que las que se encuentran por debajo de este límite inferior fueron las parcelas (símbolo redondo) que no necesitaron ninguna intervención y representaron el 28,6 % de la muestra, indicando que se

trató de parcelas poco densas, jóvenes en su mayoría. El gráfico es de aplicación en el intervalo de diámetro medio cuadrático 9 a 30. Para los valores de diámetro medio cuadrático de 30 a 45 se trata de una extrapolación del método y las curvas de volumen y de altura dominante solo son orientativas.

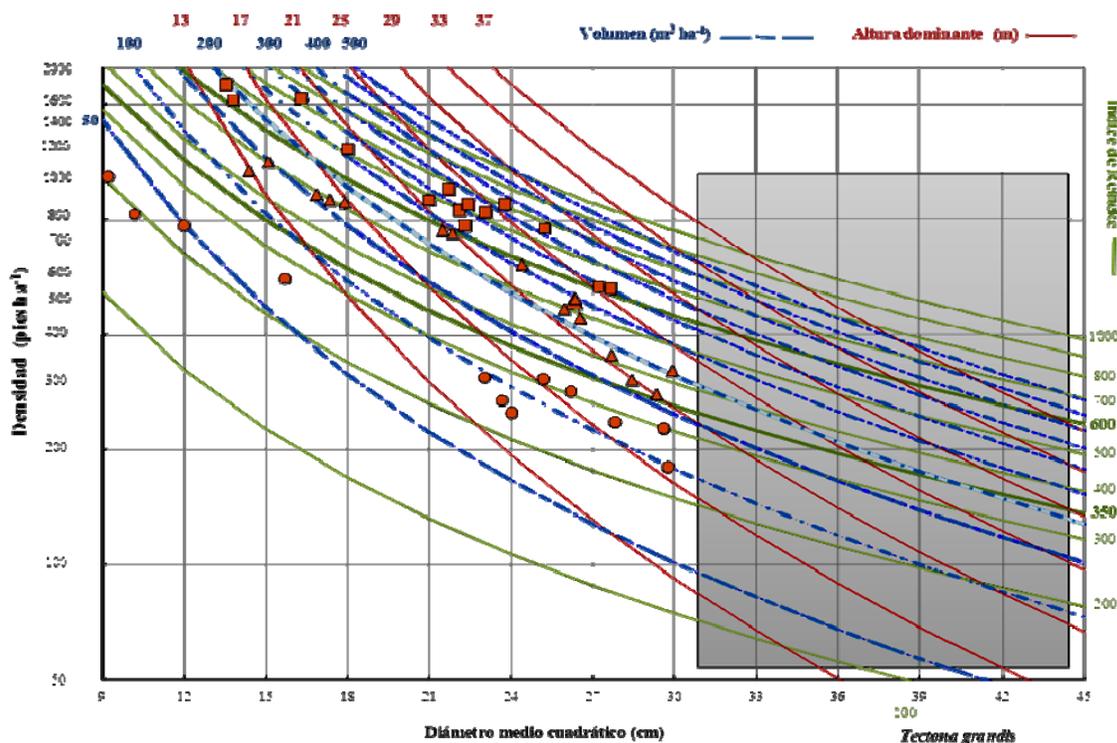


Figura 3.7. Localización de las 42 parcelas de teca medidas en el Estado de Tabasco (el sombreado gris representa las zonas en que los valores de altura dominante y volumen son una extrapolación)

III.2.3 Itinerarios selvícolas

La tabla 3.6 y la figura 3.8 mostraron los resultados de la primera propuesta selvícola donde se trató de maximizar la productividad del rodal completo. La tabla 3.7 y la figura 3.9 presentaron los resultados de la propuesta de gestión que maximiza el crecimiento del árbol individual. De hecho, en los escenarios ensayados, se realizaron dos claras dentro de un intervalo de índice de Reineke comprendido entre 60 a 35 %.

En el primer escenario (Tabla 3.6, Figura 3.8) la intensidad de la primera clara contempló un 35 % de reducción del número de árboles y la segunda clara una reducción del 50 % en número de árboles. En el segundo escenario (Tabla 3.7, Figura 3.9) la intensidad de la primera clara contempló un 50 % de reducción del número de árboles y la segunda clara

una nueva reducción, también del 50 % en número de árboles. En ambos escenarios, durante la separación temporal entre las claras, se consideró que tuvo lugar una evolución natural del rodal, dejando así un periodo de tiempo para que los arboles creciesen.

La relación entre el diámetro medio cuadrático y la densidad de las figuras 3.8 y 3.9, expresó la trayectoria de la clara y los niveles de ocupación de sitio de estas plantaciones. Estos resultados indicaron que a menor índice de densidad de Reineke se produjo un aumento del desarrollo de los árboles dejados en la clara y un mayor tamaño del árbol medio en términos de diámetro medio cuadrático y volumen.

Tabla 3.6. Manejo de densidad para *Tectona grandis* en Tabasco. Propuesta I

Corta	Dg (cm)		SDI		N (pies ha ⁻¹)		V (m ³ ha ⁻¹)		Corta V (m ³ ha ⁻¹)	Crecimiento V (m ³ ha ⁻¹)	Evolución
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después			
0-I	9	20	170	615	880	880	27	236		209	Natural
I-II	20	23	615	486	880	556	236	196	40		Corta
II-III	23	26	486	592	556	556	196	274		78	Natural
III-IV	26	32	592	413	556	278	274	205	68		Corta
IV-V	32	40	413	591	278	278	205	377		171	Natural
V-VI	40	40	591	0	278	0	377	0	377		Corta final

Nota: Dg: diámetro medio cuadrático; N: número de árboles por hectárea; V: volumen; SDI: índice de Reineke

Tabla 3.7. Gestión alternativa de manejo de densidad para *Tectona grandis* en Tabasco. Propuesta II

Corta	Dg (cm)		SDI		N (pies ha ⁻¹)		V (m ³ ha ⁻¹)		Corta V (m ³ ha ⁻¹)	Crecimiento V (m ³ ha ⁻¹)	Evolución
	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después	Antes	Después			
0-I	9	19	158	525	816	816	25	187		162	Natural
I-II	19	23	525	357	816	408	187	134	53		Corta
II-III	23	28	357	489	408	408	134	229		95	Natural
III-IV	28	35	489	350	408	204	229	179	50		Corta
IV-V	34	43	334	487	204	204	166	313		148	Natural
V-VI	43	43	487	0	204	0	313	0	313		Corta final

Nota: Dg: diámetro medio cuadrático; N: número de árboles por hectárea; V: volumen; SDI: índice de Reineke

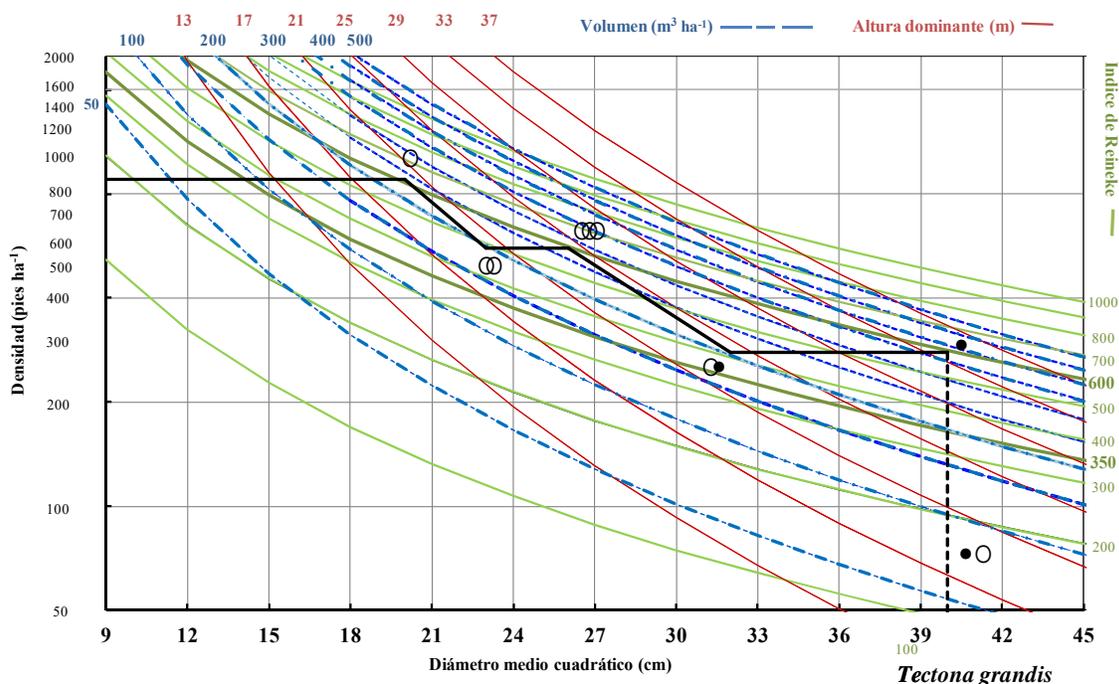


Figura 3.8. Diagrama del itinerario selvícola de la Propuesta I para teca en Tabasco (Tratamiento recomendado para conseguir la máxima producción en volumen por hectárea con un origen de una plantación real con 880 pies ha⁻¹)

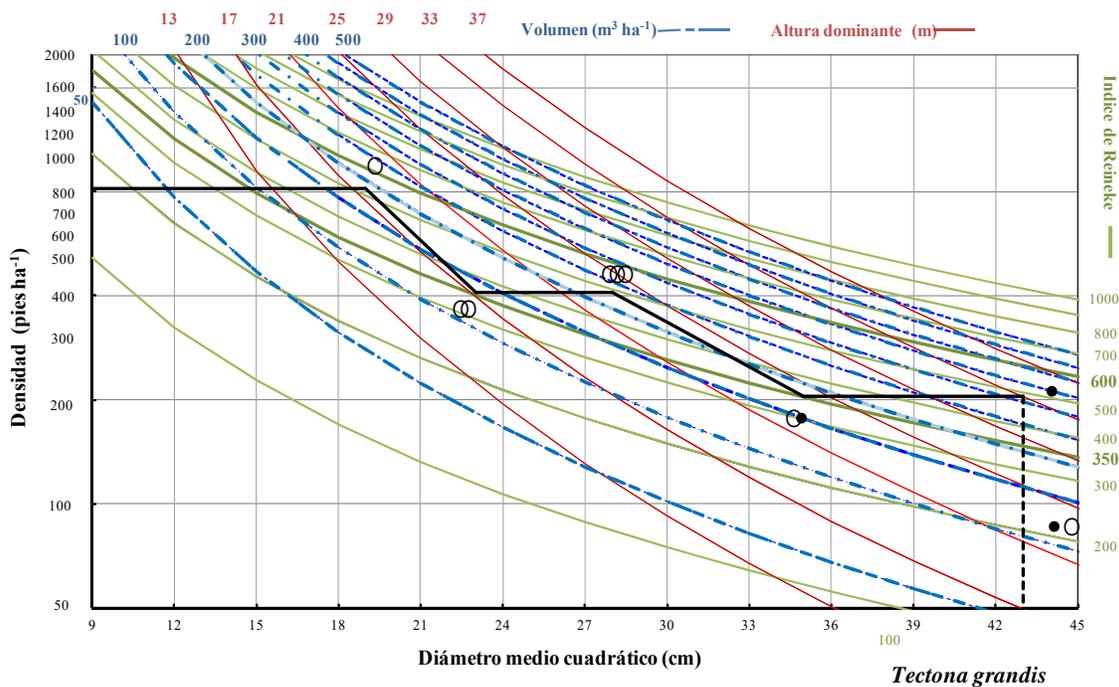


Figura 3.9. Alternativa de manejo de densidad de la Propuesta II de teca en Tabasco (Tratamiento recomendado para conseguir el máximo crecimiento diamétrico del árbol individual, punto de partida 816 árboles/ha, espaciamiento 4*3 ó 3,5*3,5)

III.3 Simulación selvícola en SiManFor

III.3.1 Proyección en SiManFor

En la tabla 3.8 se muestran las principales características de las variables de masa utilizadas para la validación del funcionamiento de los modelos utilizados en el proceso de simulación de SiManFor.

Tabla 3.8. Descripción de los datos resultantes de la simulación utilizados en la validación

Variable	Media	Desv. típica	Mínimo	Máximo
G_{obs} ($m^2 ha^{-1}$)	23,9	8,5	11,1	41,7
G_{pre} ($m^2 ha^{-1}$)	22,2	7,8	9,8	39,3
H_{obs} (m)	18,7	3,3	12,3	25,6
H_{pre} (m)	18,8	3,1	12,8	26,3
V_{obs} ($m^3 ha^{-1}$)	163,3	64,1	51,1	276,7
V_{pre} ($m^3 ha^{-1}$)	175,4	71,3	61,8	313,3

Nota: G: área basimétrica; H: altura dominante; V: volumen

En la figura 3.10 se presenta el resultado de la simulación, es decir, de la proyección en el tiempo de las variables de masa, comparándola con la evolución en el tiempo de esas mismas variables en las parcelas vivas: Volumen (Figura 3.10a), altura dominante (Figura 3.10b) y área basimétrica con la edad (Figura 3.10c). Como se puede observar la relación H vs Edad (Figura 3.10b) fue la que presentó mayores desviaciones frente a la heterogeneidad de las parcelas reales. La simulación dio una predicción muy suavizada de la evolución (Figuras 3.10d y 3.10f), debido a la eliminación de algunos árboles en el intervalo. La altura dominante experimentó variaciones bruscas (Figura 3.10e).

III.3.2 Validación del proceso de simulación

Los resultados de la validación (Tabla 3.9) mostraron que los modelos seleccionados presentaron valores de eficiencia altos o muy altos, y minimizaron los otros estimadores, valor de la raíz del error medio cuadrático RMSE y valor del criterio de información de Akaike. De los modelos seleccionados para cada una de las tres variables, el modelo en área basimétrica fue el que obtuvo mejor valor de eficiencia (0,9108), superior al modelo en volumen que presentó también una eficiencia muy alta (0.8941) y al modelo en altura, que presentó una eficiencia alta (0,7208).

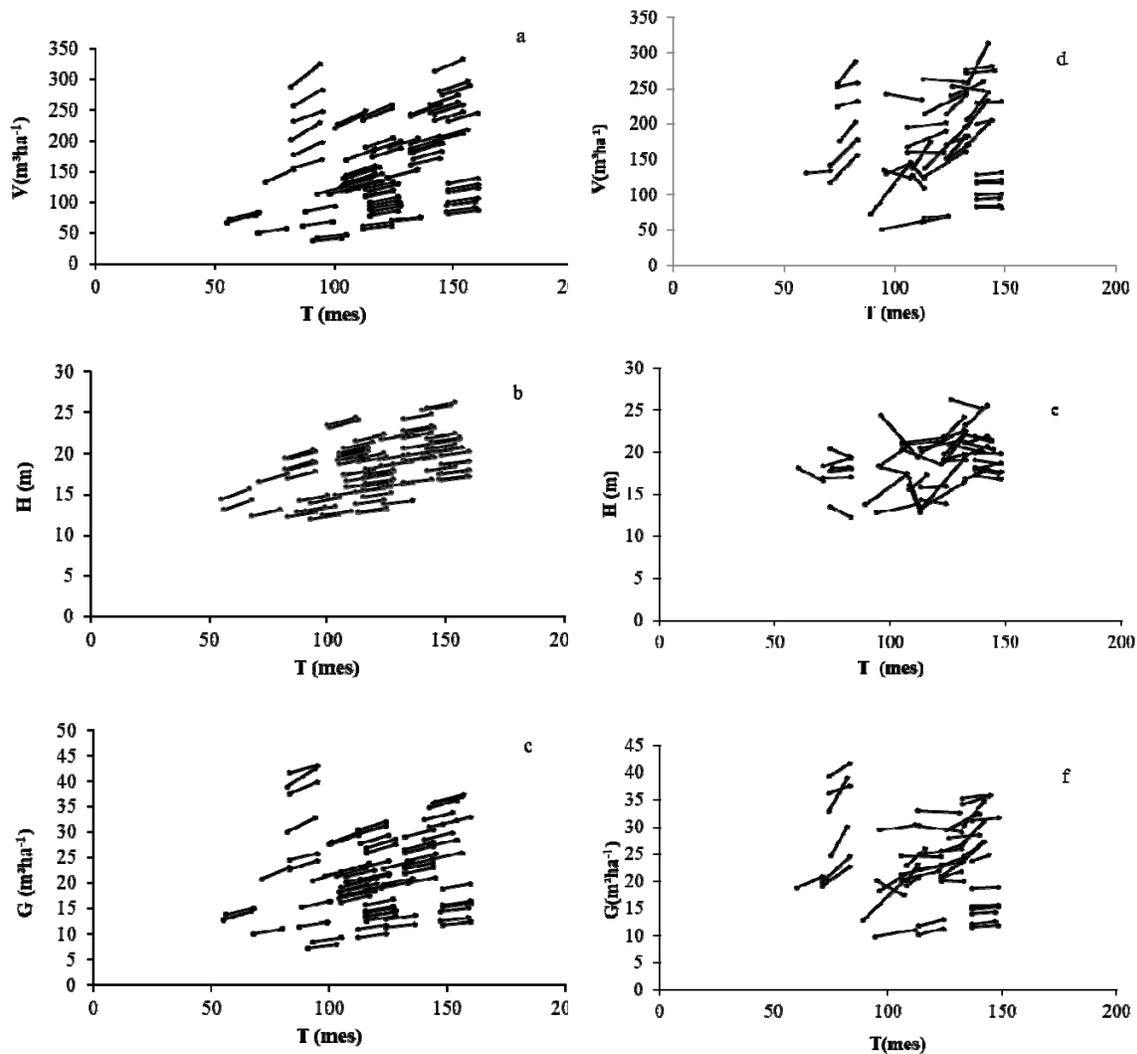


Figura 3.10. Evolución de las variables de masa en las parcelas tras la simulación del escenario selvícola en SiManFor: a) Volumen (V); b) Altura dominante (H); c) Área basimétrica (G). Evolución de las mismas variables en una selección de parcelas medidas en campo: d) Volumen (V); e) Altura dominante (H); f) Área basimétrica (G)

Tabla 3.9: Resultados de la validación del simulador con los modelos seleccionados para cada variable

Ecuación		AMRES	RMSE	EF	AIC
V_{obs}	V_{pre}	16,4405	22,5316	0,8941	225,4891
H_{obs}	H_{pre}	1,1755	1,6642	0,7202	81,4718
G_{obs}	G_{pre}	1,8481	2,4474	0,9108	146,2673

Nota: AMRES: media absoluta de residuales; RMSE: raíz del error medio cuadrático; EF: eficiencia; AIC: Criterio de información de Akaike

Los resultados entre valores observados y predichos se presentan en la figura 3.11, donde se observó una alta correlación entre los valores observados y predichos de las tres variables proyectadas. La representación de los residuos estandarizados respecto a los valores

predichos mostró la normalidad de los residuos (Figura 3.12), con una estabilidad mayor para el modelo en altura dominante respecto a los otros modelos.

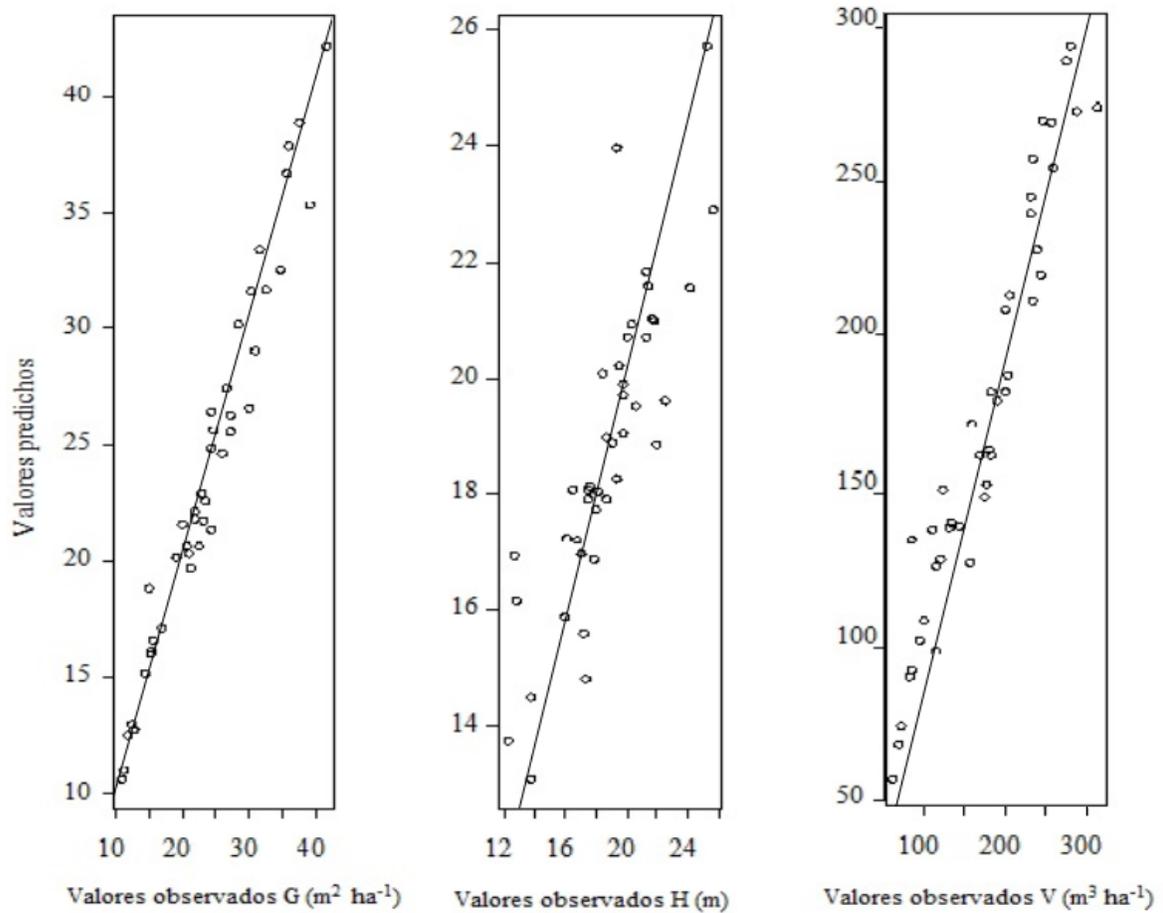


Figura 3.11. Relación lineal entre valores predichos y observados para las variables G, H y V

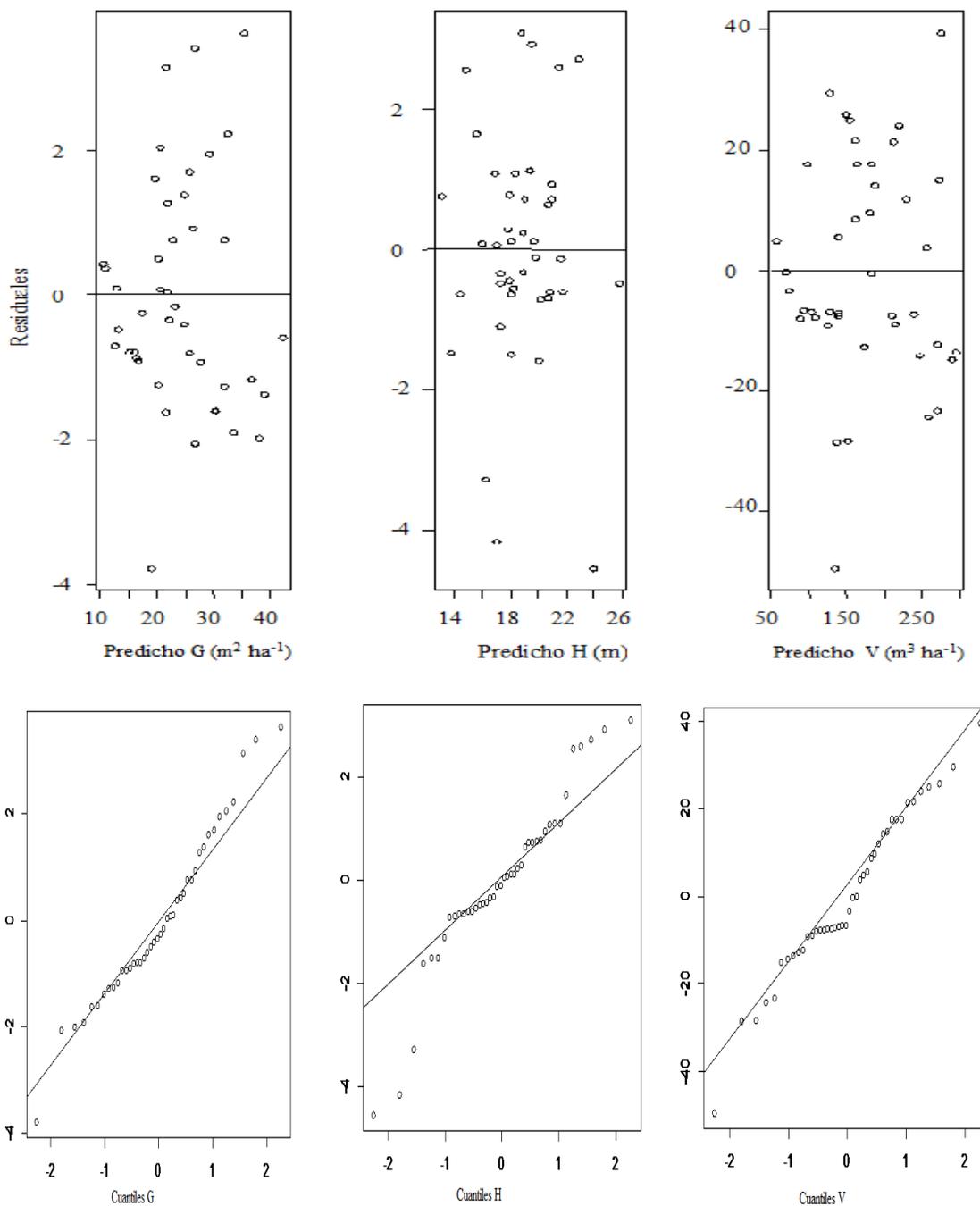


Figura 3.12. Normalidad de los residuos para las variables G, H y V simuladas

III.3.3 Simulación selvícola para la ilustración de la tabla de producción

Las simulaciones de la evolución de dos parcelas a lo largo de todo el turno, con aplicación de dos intervenciones selvícolas, se presentan en forma de tablas de producción (Tablas 3.10 A y B y 3.11 A y B). Corresponden a unas tablas de producción de selvicultura

recomendada, presentan diversas situaciones selvícolas e incluyen distintos regímenes de clara. En las dos simulaciones, las edades de intervención tuvieron un intervalo de 4, 13 y 15 años, comenzando a la edad de 12 años, llegando hasta la edad de 40 años (edad de corta o turno de corta). Estas tablas de producción no son el fin del estudio sino solo una forma de presentar de forma tabular la evolución prevista de la masa según las ecuaciones escogidas.

Comparando las tablas de producción para cada parcela se aprecia que el modelo de gestión se comportó mejor en la parcela de densidad baja al obtener un mayor volumen total. En densidad alta fue muy inferior al del modelo de densidad baja debido a una mayor ocupación del rodal. En cuanto a la densidad de Reineke, en ambas se adecuó a la norma de densidad establecida, máxima aconsejable que corresponde a 600 y mínima aconsejable que corresponde a 350. El SDI se ubicó para las dos simulaciones en que se aplicaron claras más intensas en densidades bajas próximas a 400 (entre 434 y 390) y en densidades más altas en torno a 450 (entre 500 y 407) aplicando claras menos intensas y más espaciadas (Tabla 3.10 A y B y Tabla 3.11 A y B). Sin embargo, el SDI mantuvo valores superiores con las claras más débiles (Tabla 3.11).

Las figuras 3.13 y 3.14 mostraron la evolución con la edad de las variables N y V de los datos propuestos por las tablas de producción en las dos parcelas. El análisis gráfico permitió visualizar los diferentes enfoques selvícolas que el selvicultor podrá evaluar para tomar adecuadas decisiones de gestión forestal. Así, en el primer caso, la parcela menos densa, cuando fue sometida a claras más fuertes llegó a un estado final de 279 pies ha⁻¹, en contraste a los valores obtenidos en las claras más débiles 316 pies ha⁻¹. El volumen total extraído en las tres intervenciones fue de 114,8 m³ ha⁻¹ en las claras fuertes y de 100,8 en las débiles. El volumen en pie al final del periodo fue 161,9 m³ ha⁻¹ frente a 182,9 m³ ha⁻¹. El volumen en pie más el extraído fue de 276,7 m³ ha⁻¹ frente a 283,7 m³ ha⁻¹. Por otra parte, en el segundo caso, la parcela menos densa, cuando fue sometida a claras más fuertes llegó a un estado final de 476 pies ha⁻¹ y cuando fue sometida a claras más débiles a 540 pies ha⁻¹. El volumen extraído, acumulado en las tres intervenciones fue de 103,3 m³ ha⁻¹ en las claras fuertes y de 90,6 m³ ha⁻¹ en las débiles. El volumen en pie al final del periodo fue de 140,7 m³ ha⁻¹ frente a 158,5 m³ ha⁻¹. La suma de volumen en pie y volumen extraído fue de 244 m³ ha⁻¹ en las claras más fuertes frente a 249 m³ ha⁻¹ en las débiles.

Tabla 3.10. Simulación de las parcelas seleccionadas de teca a diferentes densidades. Propuesta I, claras fuertes.)

A. Parcela de densidad baja		Masa principal antes de la clara					Masa extraída				Masa principal después de la clara				
Edad (año)	H (m)	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI
8	14	585	21,1	20,5	113,5	434					585	21,1	20,5	113,5	434
12	16	585	24,0	26,5	162,2	535	175	24,0	48,7	161	410	24,0	18,6	113,5	374
25	20	410	28,8	26,7	187,4	501	82	28,8	37,5	100	328	28,8	21,3	150,0	401
40	22	328	31,3	25,3	190,4	459	49	31,3	28,6	69	279	31,3	21,5	161,9	390
40	22	279	31,3	21,5	161,9	390									

B. Parcela de densidad alta		Masa principal antes de la clara					Masa extraída				Masa principal después de la clara				
Edad (año)	H (m)	N pies (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI	N (pies ha ⁻¹)	Dg (cm)	G (m ² ha ⁻¹)	V (m ³ ha ⁻¹)	SDI
8	12	1000	16,5	21,4	113,5	500					1000	16,5	21,4	113,5	500
12	14	1000	18,2	26,1	151,3	587	300	18,2	45,4	176	700	18,2	18,3	105,9	411
25	17	700	21,3	25,0	165,3	528	140	21,3	33,1	106	560	21,3	20,0	132,2	422
40	19	560	23,1	23,4	165,5	479	84	23,1	24,8	72	476	23,1	19,9	140,7	407
40	19	476	23,1	19,9	140,7	407									

Nota: T=edad de la masa (años); H=altura dominante (m); N=número de pies por hectárea; Dg=diámetro medio cuadrático (cm); G=área basimétrica del rodal (m²·ha⁻¹); V=volumen (m³·ha⁻¹)

Tabla 3.11. Simulación de las parcelas seleccionadas de teca a diferentes densidades. Propuesta II, claras débiles

A. Densidad															
baja		Masa principal antes de la clara					Masa extraída					Masa principal después de la clara			
Edad	H	N	Dg	G	V	SDI	N	Dg	V	SDI	N	Dg	G	V	SDI
(año)	(m)	(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ² ha ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹)		(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ³ ha ⁻¹)		(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ² ha ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹)	
8	14	585	21,1	20,5	113,5	434					585	21,1	20,5	113,5	434
12	16	585	24,0	26,5	162,2	535	146	24,0	40,5	134	439	24,0	19,9	121,6	401
25	20	439	28,8	28,5	200,2	535	88	28,8	40,0	107	351	28,8	22,8	160,2	428
40	22	351	31,3	27,0	203,2	490	35	31,3	20,3	49	316	31,3	24,3	182,9	441
40	22	316	31,3	24,3	182,9	441									
B. Densidad alta															
		Masa principal antes de la clara					Masa extraída					Masa principal después de la clara			
Edad	H	N	Dg	G	V	SDI	N	Dg	V	I	N	Dg	G	V	SDI
(año)	(m)	(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ² ha ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹)		(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ³ ha ⁻¹)		(pies ha ⁻¹)	(cm)	(m ² ha ⁻¹)	(m ³ ha ⁻¹)	
8	12	1000	16,5	21,4	113,5	500					1000	16,5	21,4	113,5	500
12	14	1000	18,2	26,1	151,3	587	250	18,2	37,8	146	750	18,2	19,6	113,4	440
25	17	750	21,3	26,6	176,2	564	150	21,3	35,2	112	600	21,3	21,3	140,9	451
40	19	600	23,0	24,9	176,1	511	60	23,0	17,6	51	540	23,0	22,4	158,5	460
40	19	540	23,0	22,4	158,5	460									

Nota: T=edad de la masa (años); H=altura dominante (m); N=número de pies por hectárea; Dg=diámetro medio cuadrático (cm); G=área basimétrica del rodal (m²·ha⁻¹); V=volumen (m³·ha⁻¹)

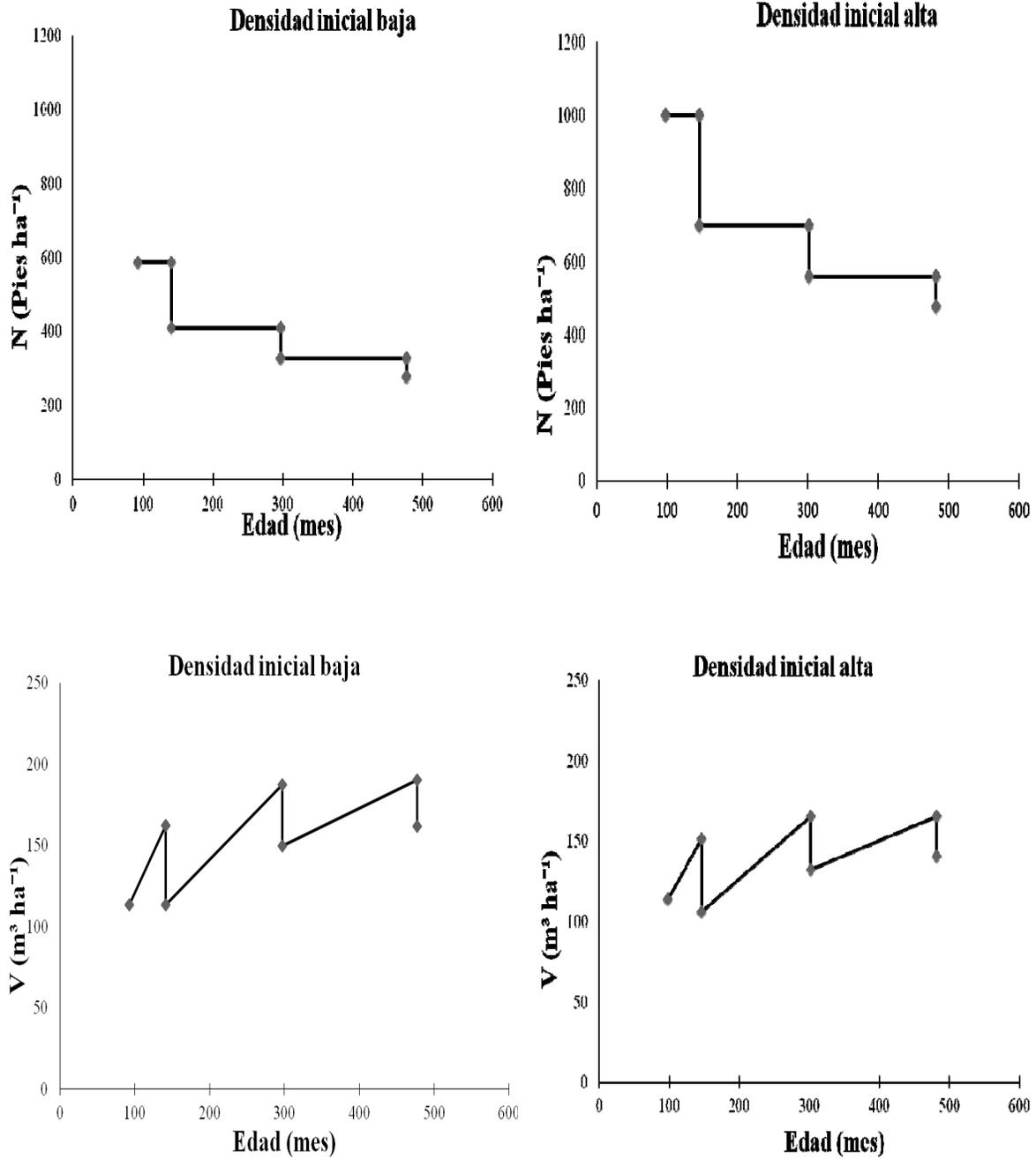


Figura 3.13. Evolución de la densidad de la masa y el volumen de dos parcelas simuladas en la plataforma SiManFor con dos densidades iniciales diferentes (baja y alta) para el tratamiento de claras más fuertes: Propuesta I

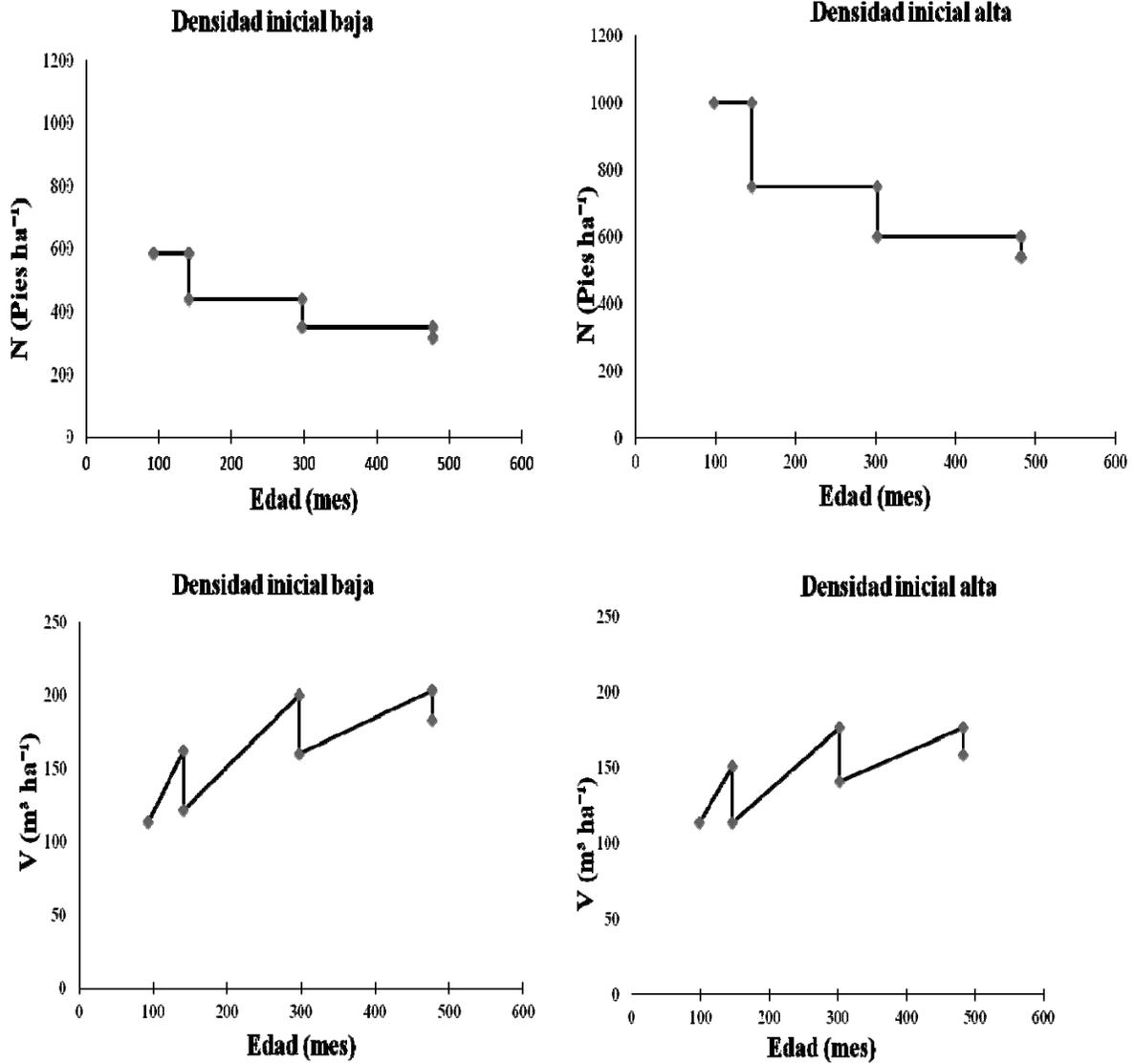


Figura 3.14. Evolución de la densidad de la masa y el volumen de dos parcelas simuladas en la plataforma SiManFor con dos densidades iniciales diferentes (baja y alta), aplicando la selvcultura de la propuesta II, claras débiles

IV Discusión

En esta tesis se han realizado tres trabajos para desarrollar herramientas científico-técnicas de gestión para las plantaciones de teca en el Estado de Tabasco (México). Estos trabajos permiten estimar la producción de los rodales y predecir una planificación con suficiente antelación (Figura 4.1).

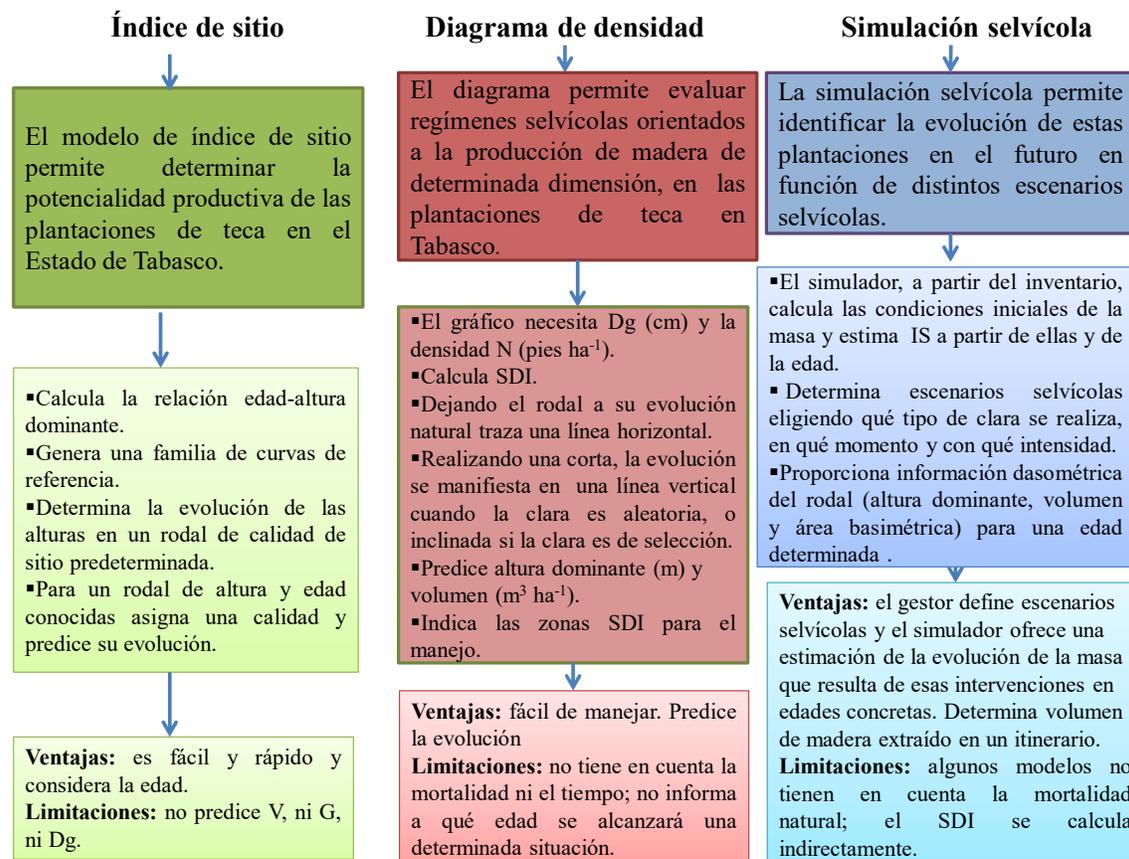


Figura 4.1. Esquema visual comparando las diferentes herramientas generadas en la tesis

IV.1 Índice de sitio

Todos los ajustes se realizaron con datos de las parcelas permanentes establecidas en plantaciones de teca con edades comprendidas entre 2,7 y 12,4 años. El rango de edad de las plantaciones no ha sido considerado limitante debido a que la teca es una especie de crecimiento rápido y en la zona de estudio se desarrolla sin limitantes hídricos ni edáficos.

El modelo para el índice de sitio ha sido ajustado utilizando el método de las ecuaciones en diferencias finitas. En este trabajo, la ecuación desarrollada por Sloboda (1971) fue elegida por ser la que mejores resultados mostró entre las cinco ecuaciones de crecimiento en diferencias finitas evaluadas. La función de McDill-Amateis presentó buenas características, pero fue descartada porque presentó los valores de los estadísticos (AMRES y RMSE) superiores a los del modelo seleccionado y también su eficiencia fue menor. La ecuación derivada de la función de Schumacher F10, aunque presentó la mayor eficiencia (EF=0,9384) de todos los modelos ajustados, mostró un valor de AMRES superior al del modelo seleccionado. Tanto el modelo de McDill-Amateis como el de Schumacher F10 fueron bastante buenos para predecir la altura dominante de *Tectona grandis* en Tabasco, sin embargo, la ecuación derivada de Sloboda (1971) presentó de forma global mejores resultados en el ajuste de las ecuaciones. Este modelo ha sido utilizado en otras especies como *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Vargas-Larreta *et al.*, 2013), *Pinus durangensis* Martínez (Hernández y Gándara, 2009) y *Pinus engelmannii* Carr. (Hernández-Ramos *et al.*, 2014) en México.

En otros estudios realizados en plantaciones de teca en el departamento de Córdoba en Colombia, Torres *et al.* (2012) encontraron resultados similares utilizando la variante polimórfica de la función de Korf. Cabe mencionar que, en el caso de las plantaciones de Córdoba, correspondiente a la parte caribeña del país, los autores utilizaron, como edad típica 12 años, debido a que son plantaciones jóvenes, de edad comprendida entre 3 y 22 años. Se encontraron cinco calidades de estación donde la especie alcanzaba una altura dominante de 24,8 m en los mejores sitios, 9,8 m en los peores sitios y 15,8 m a 18,8 m en los sitios intermedios. Por otro lado, Mora y Meza (2004) seleccionaron el modelo de Schumacher generalizado como el mejor para representar curvas de índice de sitio para teca en la vertiente del Pacífico de Costa Rica entre una serie de modelos lineales y no lineales de efectos fijos, a partir de datos de parcelas permanentes y análisis de tronco. La curva guía que escogieron sugiere un crecimiento inicial en altura bastante rápido, el cual se mantiene relativamente alto sin alcanzar una estabilización del crecimiento, incluso a los 40 años de edad.

Por otra parte, Jerez-Rico *et al.* (2011) han obtenido una curva guía para teca en Venezuela que coincide con el crecimiento inicial rápido de la teca. Los autores generaron una familia

de curvas anamórficas basadas en modelos mixtos a partir del modelo de Shumacher en sus formas lineal y no lineal para índices de sitio de 15, 18, 21, 24 y 27 m a la edad base de 16 años. El análisis de los resultados de Jerez-Rico *et al.* (2011) mostró un mejor ajuste de los modelos no lineales mixtos respecto a los otros modelos en términos de sesgo y precisión, mostrando la conveniencia de usar herramientas que consideren mediciones repetidas en una misma parcela, como las que se usaron en este trabajo. Esto explicaría que no existieran grandes diferencias entre los índices de sitio determinados en Venezuela, Costa Rica y en este trabajo. Este crecimiento inicial bastante elevado ha sido también característico en Tabasco y las curvas que se ajustaron en esa región. Sin embargo, Sajjaduzzaman *et al.* (2005) ajustaron el modelo de crecimiento de Chapman-Richards para la teca en Bangladesh. Ellos utilizaron 40 años como edad típica y obtuvieron como resultados que la altura dominante máxima fue de 23 m y la mínima de 3,5 m lo que significaría que los resultados obtenidos en nuestro trabajo son mayores en crecimientos. Por su parte, las curvas desarrolladas para Costa de Marfil por Dupuy *et al.* (1999) para la sabana Sudano-Guineense, a partir de una muestra de 200 parcelas permanentes y temporales, con edades hasta de 61 años y altura dominante hasta 60 m, presentaron un buen crecimiento, especialmente en las primeras edades. Sin embargo, alrededor de los 10 años se producía una leve disminución de la pendiente en las curvas de los tres sitios menores, lo que hacía que a partir de esta edad, dichas curvas se mantuvieran a un nivel inferior con respecto a las correspondientes curvas obtenidas en esta tesis para Tabasco. Las curvas de calidad de sitio obtenidas en este trabajo demuestran claramente que Tabasco es un excelente sitio para el establecimiento de las plantaciones de teca y además el Estado cumple con las condiciones medioambientales y edáficas para el establecimiento de la especie in-situ.

Comparando nuestros resultados con otros trabajos vemos el análisis de regresión fue superior con respecto a aquellos encontrados en Costa Rica (Bermejo *et al.*, 2004) y en la India (Upadhyay *et al.*, 2005). Por otra parte, los índices de sitio fueron mejores en Tabasco que en Costa Rica y Panamá (Mollinedo, 2003) y casi idénticos a los que se encontraron en India y Guatemala (Vaides, 2004).

La discrepancia que se aprecia entre los dos modelos de las familias de curvas (figura 3.5) fue debido a que los datos que Upadhyay *et al.* (2005) utilizaron en su respectivo trabajo

fueron más amplio que los nuestros. Por ejemplo, ellos tenían 150 parcelas para un total de 747 mediciones y las parcelas de muestreo fueron remedidas a un intervalo de 4 a 10 años donde la mayoría de las mediciones fueron realizadas a un intervalo de 5 años. Por otro lado, la edad de las parcelas fue de 4 a 93 años y además se agruparon los datos por clase de edad de 10 años para un total de 11 clases.

La sobre-estimación de la altura dominante obtenida con el modelo de Upadhyay *et al.* (2005) a partir de la edad base puede llevar a clasificaciones erróneas en la estimación de la evolución de la altura dominante con la edad. Por tanto, nuestro modelo es mejor para determinar la productividad del sitio en las plantaciones de teca en Tabasco. No obstante, un estudio similar sobre el índice de sitio se debería llevar a cabo al final de la primera rotación con el objetivo de verificar si el modelo de Sloboda (1971) sigue siendo el más apropiado para las plantaciones en la región.

Las curvas de índice de sitio generadas mediante el método de diferencias finitas que usa como base el modelo de Sloboda muestran la variabilidad del crecimiento de esta especie en el Estado de Tabasco en las áreas apropiadas para su establecimiento. En cuanto a la irregularidad de los patrones de crecimiento obtenidos con esta metodología, habría que replantearse la necesidad de encontrar nuevos y mejores indicadores de índice para las masas de teca, o bien utilizar la metodología de ajuste de los modelos GADA (diferencia algebraica generalizada), ya que este tipo de modelos suelen ser más flexibles que los ADA (diferencia algebraica). Estos modelos se complementan con el análisis de las interacciones con variables climáticas y edáficas. Cuando estas variables sean incluidas, esto permitirá por una parte, evaluar los posibles impactos del cambio climático y orientar a gestores sobre sus efectos probables en la gestión y por otra parte, tomar decisiones adecuadas dirigidas a contribuir en la solución de esta emergencia. Con la aplicación de los resultados obtenidos para las plantaciones de teca en el Estado, los gestores podrían observar las distintas tendencias del crecimiento de las masas, las cuales permiten incrementar la certeza sobre las futuras cosechas. Esta idea concuerda con el trabajo realizado por Santiago-García *et al.* (2020) que plantearon que la modelización representa una necesidad para la gestión forestal. Puesto que, se emplea en la modificación de sistemas de toma de decisiones, simuladores de crecimiento, planificación del manejo forestal de manera sostenible y sirve también de herramienta útil para pronosticar el desarrollo de los ecosistemas ante la

variabilidad climática. Sin embargo, futuros estudios podrían realizar un seguimiento a largo plazo en las plantaciones con un muestreo más amplio que será posible cuando haya más plantaciones en la región y cuando buena parte de ellas lleguen a la edad base, ya que, en la mayoría de los casos, la demanda por los productos madereros propicia la corta anticipada y no permite alcanzar siquiera la edad correspondiente al turno establecido para el aprovechamiento integral de estas plantaciones.

IV.2 Diagrama de densidad

El diagrama de densidad obtenido proporciona información sobre la densidad del rodal que hay que mantener para obtener una mayor producción del rodal. Así, fomenta una selvicultura firme y uniforme, además de ser una herramienta de apoyo a la gestión de gran facilidad de uso, lo cual puede repercutir socialmente en la comprensión de las técnicas selvícolas aplicadas. El diagrama de densidad construido en este estudio constituye una herramienta auxiliar para planificar el manejo de la densidad de rodales coetáneos de *T. grandis*, puesto que entrega información muy completa sobre el estado de las plantaciones en un momento dado, evaluando el estado selvícola de la masa en ese instante, en relación con distintos objetivos posibles.

Resultados similares a los encontrados en este estudio fueron determinados para otras especies utilizando esta misma metodología. Así, Valbuena *et al.* (2008) para dos especies de pinos en la zona mediterránea (*Pinus halepensis* Mill. y *Pinus pinaster* Ait.), encontraron un ajuste similar de los modelos, con R^2 de 0,69 para el diámetro medio cuadrático y 0,97 para el volumen. También, en el trabajo realizado sobre la teca por Tewari *et al.* (2014) en el sur de la India, encontraron un resultado similar, con un valor de R^2 de 0,74 para el diámetro cuadrático y 0,98 para el volumen total. Así mismo, Kumar *et al.* (1995) encontraron también en la India un R^2 que fue 0,89 para el diámetro medio cuadrático y 0,97 para el volumen.

En el presente estudio no se hizo una evaluación estadística para determinar el valor de la pendiente “b” para la especie en Tabasco. Se tomó como referencia el valor de -1,605 sugerido por Reineke (1933), constante para un determinado número de especies. Esta misma pendiente ha sido utilizada en el trabajo de Kumar *et al.* (1995). Sin embargo, otros autores han utilizado valores propios, como el valor de $b=1,535$ ajustado por Tamarit

(2013) para las plantaciones de teca en el Estado de Campeche (México) o el valor de 1,713 obtenido por Arias (2004) para teca en Costa Rica. Esta diferencia de valores para una misma especie en regiones diferentes puede ser debido a los factores medioambientales, a las prácticas de gestión selvícola y al origen de la masa o material genético (Comeau *et al.*, 2010). Por otra parte, el índice de densidad máxima de Reineke utilizado en este estudio es de 1000, valor inferior al valor encontrado por Kumar *et al.* (1995) que fue 1200, y a los manejados por Arias (2004), Jayaraman y Zeide (2007) y Perez y Kanninen (2005) que emplearon valores de 1053, 1102 y 1049, respectivamente y superior al determinado por Tamarit (2013) que fue de 940.

Los diagramas de manejo ofrecen además información adecuada sobre el volumen de un rodal. Al combinar los diagramas con funciones de altura dominante-edad es factible estimar el tiempo que un rodal tardará en llegar a un estado de desarrollo para los esquemas de gestión proyectados y a diferenciar tipos de claras (Vacchiano *et al.*, 2008, Castedo *et al.*, 2009). El DMD es un tipo de diagrama desarrollado para manejar de manera sostenible las masas forestales y a la vez obtener el máximo rendimiento que pueden ofrecer. Los diagramas de densidad han sido utilizados específicamente para masas regulares, aunque en la actualidad se utilizan también para estudio de masas mixtas. Así, Swift *et al.* (2007) han construido DMD para los abetos en Canadá, Acevedo-Benítez *et al.* (2018) para el género *Pinus* en la provincia de Durango en México y Quiñonez-Barraza *et al.* (2018) para bosques mixtos de Durango en México.

Para la gestión, el DMD permite simular distintas alternativas de gestión, complementando las tablas de producción de selvicultura media observada. Así, permite fijar una meta productiva y seleccionar combinaciones de espaciamiento inicial y claras para lograr un determinado objetivo (Cameron, 1988; Chauchard, 2001). Aunque las tablas de producción y los diagramas son herramientas selvícolas similares, los DMD no presuponen la evolución de la densidad, ni introducen previsiones temporales, sino que es el usuario quien fija el esquema de claras y lo dibuja sobre el gráfico, leyendo así directamente los valores que le puedan interesar. Este planteamiento coincide con lo estipulado por Woodall *et al.* (2005). En la representación gráfica del DMD, el incorporar las isóneas de altura y volumen permite tener una estimación del estado cuantitativo del rodal. La isónea de la

altura dominante puede permitir realizar una mejor proyección de la masa orientando sobre la evolución en caso de realizar las claras por lo bajo.

En el diagrama de manejo de densidad construido para las plantaciones de teca en Tabasco las operaciones de clara se basaron en la regla de auto-clareo (Reineke, 1933) empezando con un máximo de 60 % (línea 600) del índice Reineke (Dean y Baldwin, 1993) (Figura 3.6) y un mínimo de 35 % (línea 350), lo que permite una ocupación completa del sitio. Las figuras 3.8 y 3.9 y las tablas 3.6 y 3.7 muestran las opciones de gestión de densidad de la especie estudiada para una mejor comprensión de la representación de los regímenes selvícolas. Estos resultados están en concordancia con la realidad de Tabasco, donde los selvicultores aplican ese criterio de 50 % de peso en la primera clara y 50 % en la segunda, siempre en relación con la plantación inicial, independientemente de las marras producidas en el intervalo. De cada celdilla cuadrada de cuatro árboles, que crecen en casillas adyacentes, se dejan dos en la primera intervención y uno en la segunda.

El período y frecuencia de las intervenciones dependerá de las tasas de crecimiento, las que a su vez se ven afectadas por la productividad y edad del rodal. Esta última debe ser considerada cuidadosamente, dado que influye fuertemente en la capacidad de respuesta de los individuos. Así, en general, el período entre claras será menor en rodales más productivos y jóvenes, pero también dependerá del producto final objetivo.

Las líneas de clara trazadas en los diagramas de manejo de la densidad ilustraron la intervención, identificando segmentos inclinados que representan zonas de clara y segmentos horizontales que representan zonas de post-clara es decir zonas dejadas a la evolución natural (figura 3.8 y 3.9). En el caso de las líneas horizontales (post-clara), el rodal se caracteriza por el mantenimiento de la densidad y aumento del diámetro medio cuadrático. En el caso de las líneas de evolución inclinadas, éstas representaron la extracción de individuos suprimidos, intermedios y codominantes (clara por lo bajo; Nyland, 2002), donde la pendiente de la clara sigue aproximadamente las isolíneas de alturas dominantes, (no las sigue estrictamente salvo que se realice una clara estrictamente por lo bajo, porque en ese caso la clara no tiene ningún efecto sobre la altura).

Esta opción representa una guía muy útil que los selvicultores pueden utilizar para manejar sus plantaciones adecuadamente en el Estado. Esta guía es de fácil manejo y de muy bajo coste. De acuerdo con la teoría de Langsaeter (Smith *et al.*, 1997), puede planificarse el

manejo de la densidad de un rodal para maximizar el crecimiento individual o para maximizar la producción de biomasa total. En este trabajo, el tratamiento del árbol individual es el esquema selvícola más recomendado de los dos planteados para conseguir el máximo crecimiento y rendimiento de estas plantaciones en Tabasco. Por otro lado, los modelos empíricos de árboles individuales o de proceso pueden ser más útiles para entender la dinámica del ecosistema, sin embargo, los diagramas de manejo de densidad (DMD) son herramientas prácticas básicas en selvicultura extensiva aplicadas también en bosques de baja productividad.

El turno que se recomienda en Tabasco es de 18 a 25 años. Las parcelas con las que se ha realizado el presente trabajo recogen las parcelas existentes en ese momento, pero no representan todo el rango de edades que se encontrará en el futuro en las plantaciones al nivel de Tabasco ó del país (México). De hecho, los modelos (índices de sitio y diagramas de densidad) deben tomarse con cautela, toda vez que sólo representan un poco más de la mitad del turno.

IV.3 Simulación selvícola

Los modelos programados en SiManFor para realizar este trabajo son ampliamente utilizados en la investigación forestal para teca y para otras especies de importancia económica en México.

La evolución de las parcelas simuladas recogió modificaciones más lentas que se aprecian en la gráfica por curvas de mayor amplitud, y en promedio se ajustó bien al promedio de las parcelas reales, pero consideradas individualmente hubo mucha disparidad entre la evolución natural y la simulada en cada parcela concreta. La evolución natural tuvo mayor incertidumbre, las parcelas estuvieron expuestas a muchos imponderables que influyeron en su evolución tales como la mortandad natural, la ruptura de la punta de la copa por los huracanes y la irregularidad en el crecimiento originada por la variabilidad de lluvias en el año natural. Así, se detectaron variaciones bruscas que fueron atribuidas a la dificultad de medición de la altura o a la eliminación de árboles altos.

Utilizando los modelos en la plataforma SiManFor se desarrolló un escenario que permitió generar una descripción cuantitativa de la evolución del rodal en forma de tablas de producción de selvicultura recomendada, tomando como situación de partida los datos

suministrados por el usuario. SiManFor ha permitido realizar una simulación a partir del estado inicial del rodal, en la que se fijaron unos valores mínimos para las extracciones de clara y se calcularon las dimensiones de los árboles en la corta final.

Las posibilidades de uso práctico del modelo se derivan de su flexibilidad, que ha permitido plantear diferentes intervenciones selvícolas, con claras de diferente tipo y peso, distintas densidades iniciales y distintos turnos de corta final, comprobando la evolución del rodal, lo que permitiría realizar una evaluación económica de distintas alternativas selvícolas.

El análisis comparativo de las tablas 3.10 y 3.11 en las dos parcelas de densidades (baja y alta) puede ser considerado como un ejemplo de los principios clásicos de la teoría de la producción forestal en los que se plantea que la producción total es mayor con menor densidad (Assmann, 1961). Las claras más fuertes conducen a una densidad más baja en la masa residual y a un mayor volumen aprovechado en las claras, lo que era previsible. Haciendo claras más débiles se maximiza el volumen producido total, en ambos casos. Las claras más débiles conducen a un mayor volumen en la corta final, que suele producir la madera más valiosa. Además, la teca es una especie heliófila que no admite competencia por la luz solar. Martínez (1985) señala que los árboles demandantes de luz que crecen favorecidos por los claros o con condiciones de luz presentan tasas altas de crecimiento, mayores que los que reciben menos luz.

El efecto de los tratamientos selvícolas consiste, entre otros, en bajar la densidad de los árboles, eliminando los no comerciales, si la clara es por lo bajo, para crear mejores condiciones de establecimiento y crecimiento para los árboles comerciales. Los tratamientos selvícolas de gestión de densidad aplicados sucesivamente en esta simulación resultaron en una reducción del volumen inicial no comercial y en un aumento del volumen comercial al final del turno. Por lo tanto, cuando no se aplica tratamiento selvícola, el volumen aprovechable crece en menor cuantía con el tiempo y el bosque pierde valor agregado. De hecho, para obtener productos aceptables, fue necesario mantener la densidad correcta, la que se consiguió mediante la aplicación de claras, que representaron el medio fundamental por el que se pudo aumentar la productividad de las masas forestales.

Por otra parte, el modelo permitió simular distintos itinerarios de tratamientos intermedios a la masa forestal. El modelo de simulación desarrollado en este trabajo muestra en forma sencilla el potencial que tiene SiManFor para realizar trabajos sobre simulación forestal,

particularmente aquellos desarrollados utilizando datos de inventarios con varias repeticiones, y su utilidad en la gestión de plantaciones forestales.

El conjunto (modelo-simulador) es aceptable y hace previsiones excelentes a corto plazo. Sin embargo, para que tuviera mejor capacidad predictiva a medio y largo plazo necesitaría añadirse al simulador una función de supervivencia. También mejoraría probablemente su capacidad predictiva el uso de funciones ajustadas en las plantaciones de Tabasco. Las alturas dominantes se predicen con amplias diferencias sobre los valores observados, pero esto era de esperar por la amplia variabilidad de los resultados consecutivos de las mediciones de altura de los árboles.

Otros simuladores como PINEA2 (Madrigal *et al.* 2009), presentan limitaciones, puesto que sólo permiten desarrollar un único escenario, una sola simulación de un rodal, con claras de baja intensidad y está diseñado para una sola especie. En todos los casos aparece la simulación como una excelente herramienta exploratoria, que ha sido empleada para propósitos de experimentación y de evaluación, como medio de aprendizaje de nuevos sistemas, ideas o aproximaciones, y como herramienta de planificación forestal. Al respecto, Jerez *et al.* (2015) analizaron el crecimiento de las plantaciones de teca en Venezuela, su volumen aprovechable y la capacidad de secuestro de carbono en respuesta a escenarios de manejo selvícola: calidad de sitio, espaciamiento inicial y régimen de clara. Utilizaron un modelo que se basó en un sistema de ecuaciones diferenciales de acuerdo al enfoque de espacio de estados. Ellos implementaron el simulador en SIMILE v. 6.0 un lenguaje declarativo-visual. Este simulador presenta las mismas características que SiManFor ya que ofrece la experimentación de alternativas y análisis de sensibilidad al poder analizarse muchos escenarios simultáneamente. También permite examinar el efecto de cambios en los parámetros del modelo, la calidad de los datos, la eficiencia de los algoritmos de computación y la calidad de las predicciones. La experimentación con cualquier simulador permite a los usuarios analizar de manera numérica y espacial el efecto de las decisiones de gestión representadas por cada escenario. Otro trabajo de Jerez *et al.* (2018) utiliza el mismo simulador (SIMILE) para determinar el crecimiento de plantaciones forestales bajo el enfoque de modelos de árbol individual tomando como especie base la teca utilizando datos con información inicial sobre el tamaño de los árboles (diámetro normal) y sus coordenadas espaciales. Ellos integraron una función de mortalidad para

determinar la probabilidad de muerte de los árboles. Obtuvieron resultados muy significativos en el crecimiento individual de los árboles y del rodal cuando se compararon con el crecimiento observado en condiciones reales lo que se puede comparar con los resultados obtenidos en SiManFor. Sin embargo, Quintero-Méndez y Jerez-Rico (2017) utilizaron otro simulador a partir de ecuaciones diferenciales para comprobar un modelo heurístico de planificación forestal para optimizar la producción de madera y el secuestro de carbono en plantaciones de teca minimizando a la vez el tiempo de corta. Este modelo puede utilizarse para simular datos de hasta 10 000 ha y 200 rodales, independientemente de su extensión.

La eficacia del simulador SiManFor se manifiesta en que todas las variables analizadas en el trabajo presentan una eficacia paramétrica (EF) positiva, lo que significa que las tres variables (V, H y G) hacen predicciones más próximas a la evolución observada que la media de las observaciones, tal y como se pudo observar en el proceso de validación. Además, las gráficas ilustrativas de los residuos frente a los valores predichos presentaron la normalidad deseada y confirman esta eficacia del simulador y manifiestan también que no hubo homocedasticidad. Otros autores como Jerez *et al.* (2015) y Quintero-Méndez y Jerez-Rico (2017), no han validado los resultados obtenidos a partir de sus respectivos simuladores comparándolos con la evolución observada de la masa. Parece que la validación de los simuladores se reduce a las funciones que contienen y no es frecuente la validación del proceso completo de simulación como práctica común, sobre todo utilizando datos de plantaciones de teca. Aún así, es muy interesante el trabajo de Letourneau *et al.* (2013) donde validaron los datos de 41 parcelas permanentes en plantaciones de *Pinus ponderosa* Douglas ex C. Lawson de la Empresa CORFONE S.A. en la provincia de Neuquén en Argentina con un amplio rango de condiciones (19 a 35 años de edad total, 210 a 1470 pies ha⁻¹, e índices de sitio de 12 a 22,5 m) para una proyección de un año con el simulador Piltriquitrón de INTA. Los resultados obtenidos en cuanto a comparación de lo observado y lo predicho fueron similares a los obtenidos con el simulador SiManFor para la teca. Se pudo observar la normalidad de las variables analizadas, de los valores observados frente a los predichos mediante la recta y además las simulaciones fueron precisas e insesgadas. Este comportamiento avala la utilidad del simulador SiManFor para diseñar claras y evaluar sus resultados de manera eficiente.

IV.4 Discusión general

En los objetivos de la presente tesis se hace énfasis en la modelización forestal como herramienta de gestión forestal sostenible para las plantaciones de teca en el Estado Tabasco de México.

Los **beneficios económicos** esperados de la presente investigación están relacionados con la posibilidad que brinda el conocimiento de la selvicultura aplicable en las plantaciones estudiadas pues se puede planificar el aprovechamiento integral de sus recursos, obteniendo un mayor rendimiento económico.

Los **beneficios ecológicos** radican en generar información que permita una mejor toma de decisiones para implementar las prácticas selvícolas adecuadas durante la vida de la plantación forestal comercial. El conocimiento de la selvicultura óptima en estas plantaciones permite poner en valor la biomasa total en las plantaciones y estimar a la vez el carbono secuestrado en las mismas, cuestión muy importante para contrarrestar los efectos del cambio climático y también asegurar la protección hidrológica, la conservación de suelos, la disminución de la presión de extracción de madera sobre los bosques naturales y el incremento de la biodiversidad.

Los **beneficios sociales** del presente trabajo radican en que mediante el empleo de estas herramientas mejoran de forma cualitativa y cuantitativa los resultados obtenidos por los gestores, ya que les permite conocer la evolución de las plantaciones de teca, lo que redundará en una correcta planificación de las operaciones en el aprovechamiento forestal, cuestión que produce un ahorro sustancial de recursos y materiales de todo tipo con el consiguiente beneficio económico que esto reporta a las empresas, productores y gestores.

Con el empleo de las herramientas desarrolladas en esta tesis, los gestores de las plantaciones de *Tectona grandis* en el Estado de Tabasco pueden reducir la incertidumbre en la toma de decisiones en el sector forestal, y específicamente en la gestión de plantaciones forestales.

Conclusiones

Se han desarrollado tres herramientas científico técnicas para las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f) en el Estado de Tabasco (México), que cuantifican el potencial productivo de las plantaciones y proporcionan orientación para mejorar la gestión que se les aplica.

1. Se proporciona un modelo de índice de sitio para las plantaciones de teca de Tabasco, donde el modelo de Sloboda ha resultado el más adecuado para describir la evolución de la altura dominante con la edad. A partir de este modelo se han definido cinco curvas de índice de sitio (correspondientes a altura dominante 12, 15, 18, 21 y 24 metros a una edad de referencia de 10 años) que describen los hábitos de crecimiento de la especie en cinco calidades de estación. Este modelo es de fácil utilización e inmediata aplicación para los gestores responsables de planificar las políticas de gestión para la especie en la región y de llevarlas a cabo.
2. Se ha desarrollado un diagrama de manejo de la densidad que, para una densidad de la masa determinada y un tamaño de árbol caracterizado por el diámetro medio cuadrático, calcula el índice de densidad del rodal de Reineke y proporciona estimaciones bien ajustadas de la altura dominante y del volumen de madera. El diagrama es particularmente útil para evaluar el estado de desarrollo del rodal en un momento dado. Al mismo tiempo proporciona un juicio sobre la conveniencia de realizar intervenciones selvícolas y el volumen de madera que se extraerá con éstas, para la mejor toma de decisiones.
3. Se ha obtenido un modelo de simulación para la teca en Tabasco en el simulador SiManFor, que predice el desarrollo de un rodal determinado, en función de las intervenciones selvícolas que se apliquen. Se ha validado el funcionamiento de SiManFor, comparándolo con la evolución de parcelas reales. Se han elaborado tablas de producción, que sirven como modelo para aplicar diferente selvicultura, en función de los objetivos de producción. Se ha comprobado que con claras débiles se obtiene más volumen a lo largo del turno que con claras fuertes, lo que es muy útil para planificar una selvicultura de gestión adaptativa.

Referencias bibliográficas

- Acevedo-Benítez FC, González-Tagle MA, Himmelsbach W, Aguirre-Calderón OA, Jiménez-Pérez J. 2018. Diagrama de manejo de densidad para el género *Pinus* en el ejido Pueblo Nuevo, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50): 55-73.
- Aguirre CO, Vega G, Jiménez J. 1994. Guía de densidad para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en Nuevo León. *Memorias del Simposio y II Reunión Nacional de Silvicultura y Manejo de Recursos Forestales*. 43 p.
- Alemdag IS. 1991. National site-index and height-growth curves for white spruce growing in natural stands in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 21(10): 1466-1474.
- ALIANZA (Iniciativa interreligiosa para los Bosques Tropicales) 2019. Bosques tropicales: Un Recurso bajo amenaza. https://www.interfaithrainforest.org/s/Interfaith_IssuePrimer_TropicalForests_ES.pdf (consultado, 22 septiembre 2020).
- Amaro A, Reed D, Tome' M, Themido I. 1998. Modeling dominant height growth: eucalyptus plantations in Portugal. *Agricultura, Pesca y Alimentación*. 293 p.
- Anantha-Padmanabha HS. 2006. Informe internacional sobre la teca. 6 p. (Product Disclosure Statement - Rewards Group Teak Project "International Teak Market Report"). Disponible en http://www.ecobosques.com/espanol/img_eco_web/Informe_Internacional_sobre_la_Teca.pdf (consultado, 15 abril 2014).
- Ando T. 1962. Growth analysis on the natural stands of Japanese, red pine (*Pinus densiflora* Sieb. et Zucc.). II. Analysis of stand density and growth, Japan. Bulletin No.147. Government Forest Experiment station Tokyo (in Japanese with English summary).
- Arias AD. 2004. Validación del índice de densidad del rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. f. en el trópico. *Kurú: Revista Forestal Centroamericana*, 1: 1-7.
- Arias LU. 2003. Advances in management and teak productivity in Central America. Ponencia presentada en la Conferencia Internacional de IMT/Instituto de Investigación Forestal de

- Kerala sobre productos de calidad fabricados con teca de bosques bajo ordenación forestal sostenible, 2-5 de diciembre de 2003, Peechi, India.
- Assmann E. 1961. *Waldetragskunde*. München. 490 p.
- Assmann E. 1970. *The principles of forest yield study*. Pergamon Press, Oxford. 506 p.
- Auykim A, Duangsathaporn K, Prasomsin P. 2017. Growth of teak regenerated by coppice and stump planting in Mae Moh Plantation, Lampang province, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 51: 273-277.
- Avery TE, Burkhart HE. 1983. *Forest measurements*. MacGraw-Hill. 331 p.
- Bailey RL, Clutter JL. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science*, 20(2): 155-159.
- Ball J, Pandey D, Hirai S. 1999. Global overview of teak plantations. Ponencia presentada en el seminario regional sobre áreas, tecnologías y productividad de las plantaciones de teca, Chiang Mai, Tailandia.
- Barrio-Anta M, Álvarez-González JG, Ruiz gonzález AD. 2004. Ecoregional-based Stand Density Management Diagrams for *Pinus pinaster* L. in Galicia: It's use for developing thinning schedules. *The economics and Management of High Productivity Plantations*. International IUFRO Meeting. Lugo (27-30 Septiembre 2004).
- Barrio-Anta M, Álvarez-González JG. 2005. Development of a stand density management diagram for even-aged pedunculate oak stands and its use in designing thinning schedules. *Forestry*, 78(3): 209-216.
- Bates DM, Watts DG. 1980. Relative curvature measures of nonlinearity. *Journal of the Royal Statistical Society*, 42: 1-16.
- Becerra L. 1986. Determinación de una guía de densidad para *Pinus patula* Schdl. En Chignahuapan, Zacatlán, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 82 p.
- Bermejo I, Cañellas I, San Miguel A. 2004. Growth and yield models for teak plantation in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 189: 97-110.

- Blanco JA, González E. 2010. The legacy of forest management in tropical forests: analysis of its long-term influence with ecosystem-level model. *Forest Systems*, 19: 249-262.
- Blanco JA. 2012. Más allá de los modelos de crecimiento: Modelos ecológicos híbridos en el Contexto del manejo forestal sostenible. *Actas de la III Reunión sobre Modelización Forestal*. Cuadro de la Sociedad Española de Ciencias Forestales, 34: 11-25.
- Blanco JA. 2013. Modelos ecológicos: descripción, explicación y predicción. *Ecosistemas*, 22(3):1-5.
- Blaser J, Douglas J. 2000. Aspectos y repercusiones de la política y estrategia forestal emergente del banco mundial. *Actualidad Forestal Tropical*, 8(4): 9-14.
- Bollandsås OM, Buongiorno J, Gobakken T. 2008. Predicting the growth of stands of trees of mixed species and size: A matrix model for Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 23(2): 167-178.
- Botkin DB, Janak JF, Wallis JR. 1972. Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 60: 849-873.
- Bravo F, Herrero C, Ordoñez C. 2018. Detalles necesarios para la introducción de datos y ejecución de escenarios en la plataforma. Manual de uso de SiManFor. Palencia, España.
- Bravo-Oviedo A, Montero G, Río M. 2004. Site index curves and growth model for mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *Forest Ecology and Management*, 201: 187-197.
- Brickell JE. 1968. A method for constructing site index curves from measurements of tree age and height—its application to inland Douglas-fir. Research Paper INT-47. USDA Forest Service, Intermountain Forest Range Experiment Station.
- Brima SM, Sesay S. 2020. Ground forest inventory and assessment of carbon stocks in Sierra Leone, West Africa. <https://www.intechopen.com/online-first/ground-forest-inventory-and-assessment-of-carbon-stocks-in-sierra-leone-west-africa> (Consultado 02 de julio 2020).
- Calama R, Cañadas N, Montero, G. 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Annals of Forest Science*, 60: 259-269.

- Calama R, Río M, Coquillas V, Cañellas I, Montero G. 2004. Modelos de calidad de estación y de perfil de fuste de *Pinus uncinata* Ram. en el Pirineo español. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 13: 176-190.
- Camacho-Linton A, Ramírez-Maldonado H, De los Santos Posadas H, Zamudio Sánchez FJ. 2013. Tablas de rendimiento para teca (*Tectona grandis* L.) en el Estado de Campeche. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 4(19): 92-101.
- Cameron I. 1988. An evaluation of density management diagram for coastal Douglais. Min. of For. Lands, Res. Branch.
- Cañadas LA, Andrade-Candell J, Domínguez AJM, Molina HC, Schnabel DO, Vargas HJ, Wehenkel C. 2018. Growth and Yield Models for Teak Planted as Living Fences in Coastal Ecuador. Forest 9(2): 55.
- Castedo-Dorado F, Crecente-Campo F, Álvarez-Álvarez P, Barrio-Anta M. 2009. Development of a stand density Management diagram for radiata pine stand including assessment of stand stability. Forestry, 82:1-16.
- Centeno JC. 1997. The management of teak plantations. Mérida, Venezuela. Disponible en www.tremail.nl/teakscan.dal/files/mngteak.htm (consultado el 24 junio de 2015).
- Chauchard LM, Dorronsor MV. 2013. Influencia de los parámetros de los Diagramas de Manejo de la Densidad en la planificación selvícola. 6^o Congreso Forestal Español. Sociedad de Española de Ciencias Forestales. Victoria-Gasteiz, España.
- Chauchard LM. 2001. Crecimiento y producción de repoblaciones de *Pinus radiata* en el territorio histórico de Guipúzcoa. Tesis doctorales N^o 40. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 173 p.
- Chaves E, Fonseca W. 1991. Teca (*Tectona grandis* L.f.), especie de árbol de uso múltiple en América Central. Informe Técnico 179. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE/ROCAP). 47 p.
- Chudnoff M. 1984. Tropical timbers of the world. USDA Forest Service Agriculture Handbook no. 607. Washington, D.C, EEUU. 464 p.

- Cieszewski CJ, Bailey RL. 2000. Generalized Algebraic Difference approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science*, 46: 116-126.
- Clutter J, Forston J, Pienaar L, Brister G, Bailey R. 1983. *Timber management: a quantitative approach*. Wiley. Nueva York, EEUU. 333 p.
- Comeau PG, White M, Kerr G, Hale SE. 2010. Maximum density. Size relationships for Sitka spruce end coastal Douglas-fir in Britain and Canada. *Forestry*, 83: 461-468.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2005. Oro en la selva: La Teca, madera preciosa de gran valor. *Vegetación de México No. 24*. In: *México forestal* (en línea). http://www.mexicoforestal.gob.mx/nuestros_arboles.php?id=27 (consultado, 24 mayo de 2015).
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales, a 15 años de su creación. Zapopan, Jalisco, México. 152 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2015. Home page. Web site. URL: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/43/6019Principales%20especies%20maderables%20establecidas%20en%20PFC%20por%20Entidad%20Federativa%20en%202000%20-%202014.pdf> (consultado, 03 mayo 2016).
- Cornillon PA, Saint-André L, Bouvet JM, Vigneron P, Saya AR, Gouma R. 2003. Using B-Splines for growth curve classification: applications to selection of eucalypt clones. *Forest Ecology and Management*, 176: 75-85.
- Crookston NL, Rehfeldt GE, Dixon GE, Weiskittel AR. 2010. Addressing climate change in the forest vegetation simulator to assess impacts on landscape forest dynamics. *Forest Ecology and Management*, 260(11): 98-121.
- Curtis RO, Clendenen GW, DeMars DJ. 1981. A new stand simulator for coastal Douglas-fir: DFSIM user's guide. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-128 p.
- Curtis RO. 1967. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. *Forest Science*, 13:365-375.

- Davis SL, Johnson KN. 1987. Forest Management. Third edition. McGraw-Hill. New York. 730 p.
- De Camino RV, Alfaro MM, Sage LFM. 2002. Teak (*Tectona grandis*) in Central America. Forest plantations working paper 19, Forest Resources Development Service, Forest Resources, Division, FAO, Rome. 28 p.
- De Camino RV, Van Straten H, Morales JOA. 2013. Modalidades utilizadas por los intermediarios para la promoción de inversiones de teca con énfasis en las formas de propiedad. En: De Camino R, Morales JP (Eds): Las plantaciones de teca en América Latina: Mitos y realidades. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). División de Investigación y Desarrollo Turrialba, Costa Rica, Capítulo 14. Serie Técnica, Boletín nº. 397. 264-293 p.
- De los Bueis-Mellado T. 2012. Influencia de los parámetros edáficos, topográficos y climáticos sobre el índice de sitio de *Pinus sylvestris* L. en las masas de León y Palencia. Trabajo fin de máster. Escuela Técnica Superior De Ingenierías Agrarias: Universidad de Valladolid. Palencia, España.
- Dean JT, Baldwin VC .1993. Using a density-management diagram to develop thinning schedules for loblolly pine plantations. USDA Forest Service. Southern Forest Experimental Station. Res. Pap, SO 275.
- Díaz-Maroto IJ, Fernández-Pajares J, Vila-Lameiro P, Barcala E. 2010. Site index model for natural stands of rebollo oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) in Galicia, NW Iberian Peninsula. *Ciência Florestal*, 20: 57-68.
- Drew TJ, Flewelling J. 1979. Stand density management: An alternative approach and its application to Douglas Fir plantations. *Forest Science*, 25: 518-532.
- Dupuy B, Maître H, N'Guessan AK. 1999. Table de production du teck (*Tectona grandis*): l'exemple de la Côte d'Ivoire. *Bois et Forêts des Tropiques*, 261(3): 7-16.
- Elfving B, Kiviste A. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 98: 124-134.
- Fang Z, Bailey RL. 1998. Height-diameter models for tropical forests on Hainan Island in southern China. *Forest Ecology and Management*, 110: 315-327.

- FAO, PNUMA. 2020. El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas. Roma, Italia. <http://www.fao.org/publications/sofo/es/> (consultado, 17 de junio de 2020).
- FAO. 1985. Evaluación de tierras con fines forestales. Roma, Italia. Estudio FAO: Montes n° 48. FAO. 106 p.
- FAO. 1994. Directrices sobre la planificación del aprovechamiento de la tierra. Roma, Italia. Colección FAO: Desarrollo 1. FAO. 96 p.
- FAO. 1998. Datos forestales – exportaciones de madera en rollo industrial. Roma, Ytalia
- FAO. 1999. Modelo de suministro mundial de fibras. Roma, Ytalia.
- FAO. 2010. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal. Roma, Italia. Estudio FAO: Montes n° 163. www.fao.org/docrep/013/i1757s/i1757s00.htm (consultado, 17 enero 2017).
- FAO. 2012. FRA 2015. Términos y Definiciones. Documento de Trabajo de la Evaluación de los Recursos Forestales n.º 180. Roma (disponible en <http://www.fao.org/docrep/017/ap862s/ap862s00.pdf>) (consultado, 17 enero 2017).
- FAO. 2013. La FAO, los bosques y el cambio climático. Roma, Ytalia.
- FAO. 2016. El estado de los bosques del mundo 2016. Los bosques y la agricultura: desafíos y oportunidades en relación con el uso de la tierra. Roma, Italia. 2016.
- FAO. 2018. El estado de los bosques del mundo - Las vías hacia el desarrollo sostenible. Roma, Italia. 65p.
- Field C, Vásquez-Yanes C. 1993. Species of the Genus Piper provide a model to study how plants can grow in different kinds of rainforest habitats. *Interciencia*, 18: 230-236.
- Flewelling JW, Drew TJ. 1985. A stand density management diagram for lodgepole pine. In: Baumgartner D.M., Krebill R.G., Arnott J.T. Weetman G.F. (Eds.), *Lodgepole pine: The species and its management*. Washington State University, Pullman, WA. 239-244 p.
- Fonseca GW. 2004. Manual para productores de teca (*Tectona Grandis L. F*) en Costa Rica. Heredia, Costa Rica.

(http://biblioteca.catie.ac.cr:5050/repositorioforestal/bitstream/123456789/6605/1/2004_Fo_nseca_Manual Productores Teca.pdf (consultado 5 de junio 2014).

FUMIAF (Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal). 2005. Plan de Negocios para el Cultivo de la Especie forestal comercial Teca en el sureste de México. (<https://es.scribd.com/doc/53491962/Cultivo-de-Teca> (consultado, 04 de abril 2015).

Gadow K, Real P, Álvarez-González JG. 2001. Modelización del crecimiento y la evolución de bosques, 12. IUFRO, Vienna. 242 p.

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

García O. 1990. Growth of Thinned and Pruned Stands, In: James RN y Tarlton G. L. (eds.), *New Approaches to Spacing and Thinning in Plantation Forestry*, N.Z. Ministry of Forestry, FRI Bulletin No. 151.

Gezana SA, Ortega A, Andenmatten E. 2007. Diagramas de manejo de densidad para renovales de roble, raulí y coigüe en Chile. *Bosque*, 28(2): 97-105.

González-González JM, Castedo F, Diéguez U, Rojo A, Álvarez JG. 2005. Gesmo 2005 (1.00): simulador de crecimiento y clasificación de productos. CD-Rom. ISBN 84-609-8869-4.

González-Méndez M, Cruz-Cobos F, Quiñonez-Barraza G, Vargas-Larreta B, Nájera-Luna JA. 2016. Dominant height growth model for *Pinus pseudostrobus* Lindl. In Guerrero state. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(37): 7-20.

Guariguata MR. 2009. El manejo forestal en el contexto de la adaptación al cambio climático. *Revista de Estudios Sociales*, 32: 98-112.

Hamilton DA. 1990. Extending the range of applicability of an individual tree mortality model. *Canadian Journal Forest Research*, 20: 1212-1218.

Hartshorn GS. 1975. A matrix model of tree population dynamics. En Golley FB, Medina E (Eds.) *Tropical ecological systems*. Springer. Nueva York, EEUU. 41-52 p.

Hernández JA, Gándara AG. 2009. Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. *Revista Ciencia Forestal en México*, 34(105): 187-198.

- Hernández JR, García JM, Muñoz JF, García XC1, Sáenz TR, Flores CL, Hernández AR. 2013. Density Management Guide For Natural *Pinus teocote* Schlecht. et Cham. Forests in Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(19): 63-77.
- Hernández N, Soto F, Caballero A. 2009. Modelos de simulación de cultivos. Características y usos. *Cultivos tropicales*, 30(1): 00-00: Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025859362009000100014&lng=es&nrm=iso>. ISSN 0258-5936 (consultado, 30 de marzo de 2019).
- Hernández-Ramos J, García-Magaña J, Olvera-Delgadillo EH, Velarde-Ramírez JC, García-Cuevas EH, Jesús Muñoz-Flores HJ. 2014. Índice de sitio para plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. en Metztlán, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(2): 167-176.
- Horne JEM. 1966. Teak in Nigeria. Federal Republic of Nigeria: Ministry of Agriculture and Natural Resources. *Nigerian Information Bulletin (New Series)* No. 16.
- Howard AF, Valero J. 1992. A diameter class growth model for assessing the sustainability of silvicultural prescriptions in a natural tropical forest. *Commonwealth Forest Review*, 71: 171-177.
- Huang S, Titus SJ. 1992. Comparison of nonlinear height- diameter functions for major Alberta tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 22: 1297-1304.
- Huang S, Yang Y, Wang Y. 2003. A critical look at procedures for validating growth and yield models. In: Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (Eds.), *Modelling Forest Systems*. Wallingford: CABI Publishing, pp. 271-293. Lisbon, Portugal.
- INDUFOR. 2012. Forest Stewardship Council (FSC). Strategic Review on the Future of Forest Plantations. ID 11914. October 4, 2012. Helsinki, Finland.
- INEGI. 2005. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Serie II, DGG-INEGI, México.
- INEGI. 2009. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Serie III, DGG-INEGI, México.

- INEGI. 2010. Conjunto Nacional de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000, Serie IV, DGG-INEGI, México.
- ITTO. 2018. Tropical Timber Market Report. The International Tropical Timber Organization, 22(6): 1-26.
- Jayaraman K, Zeide B. 2007. Optimizing stand density in teak plantations. *Journal of Sustainable Forestry*, 24: 1-22.
- Jerez M, Quintero M, Quevedo A, Moret A. 2015. Simulador de crecimiento y secuestro de carbono para plantaciones de teca en Venezuela: una aplicación en SIMILE. *Bosque*, 36(3): 519-530.
- Jerez M, Rubio M, Quevedo A, Jerez C, Quintero M, Vincent L. 2018. Simulador de base individual espacialmente explícito para Plantaciones forestales. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 39(3): 259-129.
- Jerez-Rico M, Moret-Barillas AY, Carrero-Gámez AE, Machiavelli RE, Quevedo-Rojas AM. 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: 135-145.
- Kadambi K. 1972. Silviculture and management of teak. Bulletin No. 24, School of Forestry, Stephen F. Austin State University, Texas, USA.
- Keiding H. 1985. Seed leaflet no.4, teak, *Tectona grandis*. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark. 21 p.
- Kiviste A, Álvarez-González JG, Rojo A, González DR. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. Monografías INIA: Forestal 4. Madrid.
- Kollert W, Cherubini L. 2012. Teak resources and market assessment 2010. Available at <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/> (Consultado 22 de junio 2020).
- Kollert W, Walotek PJ. 2015. Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. Available at <http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/> (Consultado 22 de junio 2020).

- Kollert W, Walotek PJ. 2017. World teak resources, production, markets and trade. Available in The Global Teak Study. Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources. IUFRO World Series Volume 36. Vienna. Chapter 7. 84 p.
- Kotze H. 2003. A strategy for growth and yield research in pine and eucalipt plantations in Komatiland Forests in South Africa. In: Amaro A, Reed D, Soare P. (Eds.), Modelling Forest Systems. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK. 75-84 p.
- Kumar BM, Long JN, Kumar P. 1995. A density management diagram for teak plantations of Kerala in peninsular India. *Forest Ecology and Management*, 74:125-131.
- Letourneau FJ, Roccia A, Andenmatten E, Oliva E, Casado JP, Del Vas J. 2013. Simulación del crecimiento en plantaciones de *Pinus ponderosa* (Dougl) Laws de la empresa CORFONE S.A. mediante el uso del Simulador Piltriquitrón de INTA. IV Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Iguazu, Misiones, Argentina. Septiembre 23 -27. https://www.researchgate.net/publication/279539270_Simulacion_del_Crecimiento_en_Plantaciones_de_Pinus_ponderosa_Dougl_Laws_de_la_Empresa_CORFONE_SA_Mediante_el_Uso_del_Simulador_Piltriquitrón_de_INTA_Growth_simulation_of_Pinus_ponderosa_Dougl_Laws_CO (consultado, 07 de marzo 2019).
- Long JN, McCarter JB, Jack SB. 1988. A modified density management diagram for coastal Douglas-fir. *Western Journal of Applied Forestry*, 3: 88-89.
- Long JN. 1985. A practical approach to density management. *Forestry Chronocycle*, 23: 23-26.
- López JH, Valles AG. 2009. Modelos para la estimación del índice de sitio para *Pinus durangensis* Martínez en San Dimas, Durango. *Rev. Ciencia Forestal en México*, 34: 187-198.
- Loupe D. 2005. *Tectona grandis* L.f. [Internet] Record from Protabase. <http://www.prota4u.org/search.asp> (consultado, 12 de junio de 2015).
- Madi JPS, Calegario N, Môra R, Carvalho MPLC, Carvalho SPC. 2020. Density management in clonal *Tectona grandis* Linn. f. plantations. *Scientia Forestalis*, 48(125): 1-10.
- Madrigal G, Gordo J, Montero G, Calama R. 2009. PINEA2 v1.0: Aplicación informática para la gestión de las masas regulares de *Pinus pinea* L. en la Meseta Norte. Caso de estudio.

En: S.E.C.F.-Junta de Castilla y León (eds.), *Actas del 5º Congreso Forestal Español* 5CFE01-236: 2-9. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Pontevedra.

Malende YH, Temu AB. 1990. Site-index curves and volume growth of teak (*Tectona grandis*) at Mtibwa, Tanzania. *Forest Ecology and Management*, 31: 91-99.

Martínez RM. 1985. Claros, ciclos vitales de los arboles tropicales y regeneración natural de las selvas altas perennifolias. In: Investigaciones sobre la regeneración de selvas altas en Veracruz, México. A. Gómez-Pompa y S. del Amo (eds.) Vol. II. Editorial Alhambra Mexicana. México, México. 191-240 p.

Martínez-Zurimendi P, Domínguez-Domínguez M, Juárez-García A, López-López LM, De-la-Cruz-Arias V, Álvarez-Martínez J. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia de México*, 38(4): 415-425.

McCarter JB, Long JN. 1986. A lodgepole pine density management diagram. *Western Journal of Applied Forestry*, 1: 6-11.

McDill ME, Amateis RL. 1992. Measuring forest site quality using the parameters of a dimensionally compatible height growth function. *Forest Science*, 38(2): 409-429.

Meyer HA. 1940. A mathematical expression for height curves. *Journal of Forest*, 38: 415-420.

Mollinedo MS. 2003. Relación suelo-planta, factores de sitio y respuesta a la fertilización, en plantaciones jóvenes de teca (*Tectona grandis* L. f.), en la zona Oeste, cuenca del canal de Panamá. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 89 p.

Monserud RA. 1984. Height growth and site index curves for inland Douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science*, 30(4): 943-965.

Mora F, Gómez M. 2003. Ecuaciones y tablas de volumen para árboles individuales en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) en la Vertiente del Pacífico, Costa Rica, 22 pp. <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11573e/A11573e.pdf>.

Mora FA, Meza V. 2004. Comparación del crecimiento en altura de la Teca (*Tectona grandis*) en Costa Rica con otros trabajos previos y con otras regiones del mundo, Universidad

- Nacional, Heredia, Costa Rica. Available at: www.una.ac.cr/inis/discusión (consultado, 20 September 2013).
- Navarro-Cárcamo C, Angel-Herrera M, Drake-Aranda F, Donoso PJ. 2011. Stand density management diagram and its thinning applications in *Drimys winteri* second-growth forests in southern Chile. *Bosque*, 32(2): 175-186.
- Newton PF, Weetman GF. 1993. Stand density management diagrams and their development and utility in black spruce management. *Forestry Chronicle*, 69: 421-430.
- Newton PF. 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management*, 98: 251-265.
- Nunifu TK, Murchison HG. 1999. Provisional yield models of teak (*Tectona grandis* Linn F.) plantations in northern Ghana. *Forest Ecology and Management*, 120: 171-178.
- Nyland R. 2002. *Silviculture, Concepts and Applications*. McGraw-Hill Companies. New York, USA. 633 p.
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2020. <https://news.un.org/es/story/2020/03/1471542> (consultado, 17 de junio de 2020).
- Oteng-Amoako A, Sarfo D. 2003. Development of teak plantations in Ghana: propagation, processing, utilization and marketing. Ponencia presentada en la Conferencia Internacional de OIMT/Instituto de Investigación Forestal de Kerala sobre productos de calidad fabricados con teca de bosques bajo ordenación forestal sostenible, 2-5 de diciembre de 2003, Peechi, India.
- Palahí M, Tomé M, Pukkala T, Trasobares A, Montero G. 2004. Site index model for *Pinus sylvestris* in north-east Spain. *Forest Ecology and Management*, 187: 35-47.
- Perez D, Kanninen M. 2005. Stand growth scenarios for *Tectona grandis* plantations in Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 210: 435-441.
- Philip MS. 1994. *Measuring Trees and Forests*. CAB International, Wallingford.
- Prado JD. 2015. *Plantaciones Forestales. Más allá de los árboles*. Colegio de Ingenieros Forestales A.G. Santiago de Chile, Chile. 15p.
- Prebble C. 1999. Los frutos del bosque. *Actualidad Forestal Tropical*. OIMT, 7 (1): 1-2.

- Prodan M, 1965. *Holzmesslehre*, J.D. Sauerlanders Verlag, Frankfurt Am. Main. 644p.
- Quintero-Méndez M, Jerez-Rico M. 2017. Un enfoque metaheurístico para optimizar la planificación de cortas en plantaciones forestales. *Ciencia e Ingeniería*, 38(3): 249-258.
- Quintero-Mendez MA, Jerez-Rico M. 2017. Heuristic forest planning model for optimizing timber production and carbon sequestration in teak plantations. *iForest* 10: 430-439.
- Quiñonez-Barraza G, Tamarit-Urías JC, Martínez-Salvador M, García-Cuevas X, De Los Santos-Posadas HM, Santiago-García W. 2018. Densidad máxima y diagrama de manejo de la densidad para bosques mezclados de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24: 73-90.
- Ramírez-Angulo H, Ablan M, Torres-Lezama A, Acevedo MF. 2006. Simulación de la dinámica de un bosque tropical en los llanos occidentales de Venezuela. *Interciencia*, 31(2): 101-109.
- Ratkowsky DA, Reedy TJ. 1986. Choosing near-linear parameters in the four-parameter logistic model for radioligand and related assays. *Biometrics*, 42: 575-582.
- Raulier F, Lambert MCL, Poithier D, Ung CHU. 2003. Impact of dominant tree dynamics on site index curves. *Forest Ecology and Management*, 184: 65-78.
- Reineke LH. 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46: 627-638.
- Richards FJ. 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Biology*, 10: 290-300.
- Rodríguez F. 2005. Modelos de producción de las choperas del Valle del Cinca. Tesis doctoral. Universitat de Lleida.
- Rogers R. 1983. Guides for thinning shortleaf pine. In *Proceedings of the second biennial southern silvicultural research conference*. Department of Agriculture, Forest Service. General Technical Report SE-24, Atlanta, GA, USA, pp. 217-225.
- Rojo A, Montero G. 1996. El pino silvestre en la Sierra de Guadarrama. Centro de publicaciones del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. 293 p.

- R-project. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R foundation for Statistical Computing, Vienna. URL <http://www.R-project.org>.
- Sajjaduzzaman MD, Mollick AS, Mitlohner R, Nur Muhammed N, Kamal MT. 2005. Site index for teak (*Tectona grandis* Linn. F.) in Forest Plantations of Bangladesh. International Journal of Agriculture and Biological, 7(4): 547-549.
- Salas C, Gregoire GT, Craven DJ, Gilabert H. 2016. Modelación del crecimiento de bosques: estado del arte. Bosque, 37(1): 3-12.
- Santiago-García W, Ángeles-Pérez G, Quiñonez-Barraza G, De los Santos-Posadas HM, Rodríguez-Ortiz G. 2020. Avances y perspectivas en la modelación aplicada a la planeación forestal en México. Madera y Bosque, 26(2): 1-38.
- SAS INSTITUTE INC. 2012. SAS/STAT 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, NC.
- Savill P, Evans J, Auclair D, Falck J. 1997. Plantation Silviculture in Europe. Oxford University Press, Oxford.
- Schober R. 1988. Von Zukunfts und Elitebaumen. Allgemeine Forst-ung Jagdzeitung, 159: 239-248.
- Schumacher FX. 1939. A new growth curve and its application to timber yield studies. Journal of Forestry, 37: 819-820.
- Seber GAF, Wild CJ. 1989. Nonlinear regression. J.Wiley, New York. 768 p.
- Shugart HH, Smith TM. 1992. Modelos para predecir la dinámica de los bosques boreales en respuesta al cambio ambiental. Unasylva, 43: 30-38.
- Sibbesen E. 1981. Some new equations to describe phosphate sorption by soils. Journal of Soils Science, 32: 67-74.
- Sloboda B. 1971. Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung. Mitt. D. Baden-Württembergischen Forstl. Versuchsanst. H. 32. 109 p.
- Smith DM, Larson BC, Kelty MJ, Ashton PM. 1997. The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology. Ninth Edition. John Wiley and Sons, Inc. New York, 537 p.

- Smith VG. 1984. Asymptotic site-index curves, fact or artifact? *Forestry Chronicle*, 60: 150-156.
- Soares P, Tomé M, Skovsgaard JP, Vanclay JK. 1995. Evaluating a growth model for forest management using continuous forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 71: 251-265.
- Stage AR. 1975. Prediction of height increment for models of forest growth. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-164.
- Streets RJ. 1962. *Exotic trees of the British Commonwealth*. Clarendon Press, Oxford.
- Swift E, Penner M, Rolland G, Knox J. 2007. A stand density management diagram for spruce-balsam fir mixtures in New Brunswick. *Forestry Chronicle*, 83: 187-197.
- Tamarit JC, De los Santos HM, Aldrete A, Valdez JR, Ramírez HM, Guerra VC. 2014. Dynamic site index equations for *Tectona grandis* at Campeche, Mexico. *Agrociencia*, 48(2): 225-238.
- Tamarit JC. 2013. Cubicación, crecimiento y rendimiento maderable e inventario operativo para la *Tectona grandis* en el Sureste de México. Tesis doctoral. Institución de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. Montecillo, Texcoco, México.
- Tang S. 1994. Self-adjusted height-diameter curves and one entry volume model. *Forest Research*, 7(5): 512-518.
- Tewari VP, Álvarez-González JG. 2014. Development of a stand density management diagram for teak forests in southern India. *Journal of Forest and Environmental Science*, 30: 259-266.
- Tewari VP, Singh B. 2017. A first-approximation simple dynamic growth model for forest teak plantations in Gujarat state of India. *Southern Forests: a journal of Forest Science*, 80(1): 59-65.
- Tomé M. 1988. Modelação do crescimento da árvore individual em povoamentos de *Eucalyptus globulus* Labill (1ª rotação). Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa. 231 p.

- Torres DA, Del Valle JI, Restrepo G. 2012. Site index por teak in Columbia. *Journal of Forestry Research*, 23(3): 405-411.
- Torres DA, Del Valle JI, Restrepo G. 2020. Teak growth, yield- and thinnings' simulation in volume and biomass in Colombia. *Annals of Forest Research*. 63(1):1-18.
- Torres JM, Magaña O. 2001. *Evaluación de Plantaciones Forestales*. Limusa. Mexico. 472 p.
- Trujillo E. 2014. [La "calificación del sitio" Clave para iniciar una plantación forestal.](http://elsemillero.net/la-calificacion-del-sitio-clave-para-iniciar-una-plantacion-forestal/)
<http://elsemillero.net/la-calificacion-del-sitio-clave-para-iniciar-una-plantacion-forestal/>
(Consultado 02 de abril 2019).
- Ugalde L. 1988. MIRA: Un sistema de gestión de información sobre recursos arbóreos. *Actividades en Turrialba*, 16(2-3): 1-4.
- Upadhyay A, Eid T, Sankhayan PL. 2005. Construction of site index equations for even aged stands of *Tectona grandis* (teak) from permanent plot data in India. *Forest Ecology and Management*, 212(205): 14-22.
- Vacchiano G, Motta R, Long J, Shaw J. 2008. A density management diagram for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.): a tool for assessing the forest's protective effect. *Forest Ecology and Management*, 255: 2542-2554.
- Vaides EE. 2004. Características de sitio que determinan el crecimiento y productividad de teca (*Tectona grandis* L. f.), en plantaciones forestales de diferentes regiones en Guatemala. Tesis de Magister Ciencia. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- Valbuena P, Peso C del, Bravo F. 2008. Stand density management diagrams for two Mediterranean pine species in eastern Spain. *Investigación Agraria Sistemas y Recursos Forestales*, 17: 97-104.
- Vanclay JK. 1994. *Modelling forest growth and Yield; Applications to mixed tropical forests*. Wallingford, CAB International, UK. 297 p.
- Vanclay JK. 1995. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods. *Forest Science*, 41(1): 7-42.
- Vanclay JK. 1998. TROPIS: Tree growth and permanent plot information system. *Journal of Forest Planning*, 4: 1-5.

- Vargas-Larreta B, Aguirre-Calderon OC, Corral-Rivas JJ, Crecente-Campos F, Diéguez-Aranda U. 2013. Modelo de crecimiento en altura dominante e índice de sitio para *Pinus pseudostrobus* Lindl. en el noreste de México. *Agrociencia*, 47: 91-106.
- Vargas-Larreta B, Corral-Rivas JJ, Aguirre-Calderón OC, Nagel J. 2010. Modelos de crecimiento de árbol individual: Aplicación del Simulador bwinpro7. *Madera y Bosques*, 16(4): 81-104.
- Vincent L. 1980. Manejo de plantaciones forestales con fines de producción. Universidad de los Andes. Facultad Ciencias Forestales. Centro de Estudios de Postgrado. Dpto. Manejo de Bosques. Merida, Venezuela. 90 p.
- Walters DK, Gregoire TG, Burkhart HE. 1989. Consistent estimation of site index curves fitted to temporary plot data. *Biometrics*, 45: 23–33.
- Wang Y, Lamim RJM, Tiwary P. 2020. Machine learning approaches for analyzing and enhancing molecular dynamics simulation, *Structural Biological*, 61: 139-145.
- White KJ. 1991. Teak, some aspects of research and development. RAPA Publication 1991/17. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, FAO, Bangkok. 69 p.
- Williams M. 2002. Deforesting the earth: from prehistory to global crisis. Chicago (Estados Unidos de América), University of Chicago Press.
- Wilson FG. 1946. Numerical expression of stocking in terms of height. *Forestry*, 44: 758-761.
- Woodall CW, Miles DP, Vissage SJ. 2005. Determining maximum stand density index in mixed stands for strategic-scale stocking assessments. *Forest Ecology and Management*, 216: 367-371.
- Yoda K, Kira T, Ogawa H, Hozami K. 1963. Self thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions. *Journal of Biology*, 14: 107-129.
- Zeide B. 1992. Analysis of growth equations. *Forest Science*, 39(3): 594- 616.
- Zepeda BE, Villareal DM. 1987. Guía de densidad para *Pinus hartwegii* Lindl. de Zoquiapan, México. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. 52 p.

ANEXOS:

ENLACE A LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS:

Minoche D, Herrero de Aza C, Dominguez-Dominguez M, Martínez-Zurimendi P. 2017. Determining the site index of Teak (*Tectona grandis* L.) plantations in Tabasco, Mexico. *Cien. Inv. Agr.* 44(2): 154-167. -doi: 10.7764/rcia.v44i2.1645.

Enlace al artículo: <https://www.rcia.uc.cl/index.php/ijanr/article/view/1645/1258>

Minoche D, Risio-Allione L, Herrero de Aza C, Martínez-Zurimendi P. 2017. Density management diagram for teak plantations in Tabasco, Mexico. *iForest* 10: 909-915.– doi: 10.3832/ifor2247-010.

Enlace al artículo: <http://www.sisef.it/iforest/pdf/?id=ifor2247-010>