



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

PROGRAMA DE POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**SISTEMA DE CRECIMIENTO PARA EVALUAR
SUMIDEROS DE CARBONO EN BOSQUES DE
Pinus patula EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO**

DORIAN DE JESÚS PALACIOS CRUZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe C. DORIAN DE JESUS PALACIOS CRUZ, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Dr. Héctor M. de los Santos Posadas, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis Sistema de crecimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de Pinus patula en Zacualtipán, Hidalgo

y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 12 de julio de 2018



Firma del
Alumno (a)



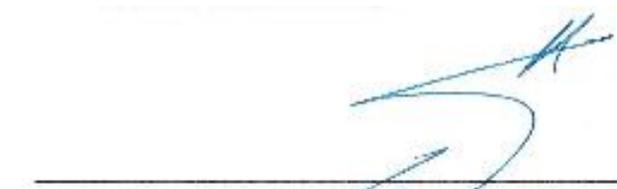
Dr. Héctor M. de los Santos Posadas
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada “Sistema de crecimiento para evaluar sumideros de carbono en bosques de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo”, realizada por el alumno: DORIAN DE JESUS PALACIOS CRUZ, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. HÉCTOR M. DE LOS SANTOS POSADAS

ASESOR



DR. GREGORIO ÁNGELES PÉREZ

ASESOR



DR. AURELIO M. FIERROS GONZÁLEZ

ASESOR



DR. WENCESLAO SANTIAGO GARCÍA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto de 2018

Este trabajo de investigación fue financiado por el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de Estados Unidos de América, a través de la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura, y la Northern Research Station, a través del proyecto **“Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoramiento del manejo forestal en México”**.

SISTEMA DE CRECIMIENTO PARA EVALUAR SUMIDEROS DE CARBONO EN BOSQUES DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Dorian de Jesús Palacios Cruz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue construir un sistema de crecimiento para estimar el rendimiento en volumen de *Pinus patula* y carbono almacenado en la parte aérea en los bosques con manejo forestal de Zacualtipán, Hidalgo. Los datos se obtuvieron de 160 sitios de 400 m² establecidos en 2013 y remedidos en 2014 y 2016, ubicados dentro del Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono (SMIC) Atopixco. La superficie del SMIC es de 900 ha y la edad de los rodales variaron de 2 a 34 años. El sistema está compuesto por ecuaciones de altura dominante, área basal, número de árboles, volumen, biomasa y carbono para *P. patula* y para hojosas. Se incluyó un componente para modelar el efecto de la proporción de hojosas. El carbono almacenado a nivel árbol se estimó a través de ecuaciones de biomasa desarrolladas para la región. Se encontraron cinco calidades de índice de sitio (*IS* 15, 20, 25, 30 y 35 m a la edad base de 40 años). El turno técnico en volumen ocurre en promedio a los 29 años, en el índice de sitio promedio (*IS* 30) a esta edad se producen 329.8 m³ ha⁻¹, lo cual indica que el turno de 40 años usado en la región puede ser más corto mediante la aplicación de prácticas silvícolas intensivas (aclareos fuertes) con el fin de mantener una distribución de productos orientada al aserrío. La inclusión del componente de proporción de hojosas permitió modelar la competencia interespecífica y el efecto sobre la especie comercial (pino). El sistema estima el carbono almacenado en 84.8 Mg ha⁻¹ para el *IS* 30 a la edad de 35 años, valor muy cercano a los obtenidos en bosques con manejo en la región y en bosques naturales de otras especies.

Palabras clave: altura dominante, cronosecuencia, rendimiento, hojosas, diferencia algebraica, *Pinus patula*.

GROWTH AND YIELD SYSTEM AS AN ASSESSMENT TOOL FOR CARBON SINKS IN *Pinus patula* FORESTS AT ZACUALTIPAN HIDALGO

Dorian de Jesús Palacios Cruz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

ABSTRACT

The present study developed a timber-aerial carbon growth and yield system for managed forests of *Pinus patula* at Zacualtipan Hidalgo. Data were obtained from 160 plots of 400 m² established in 2013 and re-measured at 2014 and 2016. The plots are part of the Atopixco Intensive Carbon Monitoring Site (AICMS) network. The total area of influence of the AICMS covers 900 ha and the range of ages for the stands spans from 2 to 34 years. The growth system includes equations for dominant height, basal area, surviving trees, volume, aerial biomass and Carbon per ha for *Pinus patula* and broadleaves. A broadleaves proportion component was also added to the system. Aerial carbon at tree level was estimated using biomass models developed for the region. Five site index classes were identified (15, 20, 25, 30 y 35 m at 40 year base-age). Volume rotation for the average site index (30 m) was estimated to occur at age 29 yielding 329.8 m³ ha⁻¹, suggesting that the regional 40-year rotation can be shortened with a more intensive silviculture (such as heavy thinnings) oriented to larger sawtimber production. The broadleaves proportion allowed intraspecific competition modelling as well as pine yield effect. The system estimates 84.8 Mg ha⁻¹ for site index 30 at age 35, which is similar to values obtained for managed forests in the region and in natural stands of other species.

Keywords: dominant height, chronosequence, yield, broadleaves, algebraic difference, *Pinus patula*.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mi madre Isabel Yanet Cruz Natarén y a mi padre Abel de Jesús Palacios Velázquez quienes han sido fundamentales durante todo mi recorrido tanto académico como personal. Con toda mi admiración y amor por todo su esfuerzo y sacrificio para hacer de mí el hombre que ahora soy.

A toda mi familia, porque aun estando lejos de mí, siempre he recibido su cariño y apoyo incondicional, en especial a mi hermano Diego Ronay y a mis abuelitas Julia Natarén y Rosario Velázquez.

Dorian de Jesús Palacios Cruz

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Colegio de Postgraduados y al posgrado en Ciencias Forestales, por permitirme llevar a cabo mis estudios de manera satisfactoria y por la calidad y dedicación que cada uno de sus miembros imprime día con día.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por brindarme el financiamiento necesario para continuar con mi desarrollo profesional.

Al Dr. Héctor M. de los Santos Posadas, mi profesor consejero, quien me ha guiado con esmero y disposición a través de mi estancia en el Colegio de Postgraduados y para realizar esta investigación.

Al Dr. Gregorio Ángeles Pérez, el Dr. Aurelio M. Fierros González y el Dr. Wenceslao Santiago García por su contribución en mi formación, por sus valiosas aportaciones para este trabajo y conocimientos impartidos durante el curso de mi maestría.

A mis profesores del Colegio de Posgraduados por compartir conmigo parte de los conocimientos teóricos y prácticos que poseen para hacer mi formación más completa.

A mis queridos amigos y compañeros, quienes han sido parte de mi formación y me han acompañado durante mis estudios haciendo que mi estancia en la maestría haya sido una experiencia agradable y llevadera. Les agradezco por todos los momentos vividos en esta etapa.

CONTENIDO

RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Funciones de crecimiento	4
2.1.1. Concepto de crecimiento	4
2.1.2. Modelos de crecimiento	4
2.1.3. Tipos de modelos de crecimiento.....	5
2.2. Sistema de crecimiento y rendimiento.....	7
2.2.1. Índice de sitio y altura dominante	7
2.2.2. Construcción de curvas de índice de sitio	9
2.2.3. Área basal	11
2.2.4. Número de árboles	12
2.2.5. Volumen	12
2.2.6. Biomasa y carbono	13
2.2.7. Componente de hojosas.....	15
2.3. Especie de interés comercial.....	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Área de estudio	18

3.2.	Obtención de datos	19
3.3.	Volumen y biomasa de cada árbol.....	21
3.4.	Altura dominante	22
3.5.	Proporción de área basal de hojosas	25
3.6.	Área basal	26
3.7.	Número de árboles vivos en el tiempo	27
3.8.	Volumen	28
3.9.	Biomasa y carbono	29
3.10.	Ajuste del sistema	30
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	Modelo de altura dominante	31
4.2.	Modelo de proporción de área basal de hojosas	34
4.3.	Modelo número de árboles en el tiempo	35
4.4.	Modelos de área basal.....	36
4.5.	Modelos de volumen y biomasa	38
4.6.	Uso del sistema de crecimiento	39
5.	CONCLUSIONES	48
6.	LITERATURA CITADA	50

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos de predicción y proyección anamórficos y polimórficos de altura dominante ajustados.....	24
Cuadro 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos de altura dominante para <i>Pinus patula</i>	31
Cuadro 3. Estadísticos de ajuste y parámetro del modelo de proyección de la proporción de área basal (q_2).	34
Cuadro 4. Valores proyectados de la proporción de área basal de hojosas (q_2) en rodales de <i>Pinus patula</i> , para un intervalo de q_1 , E_1 , y E_2 usando la ecuación (1).....	35
Cuadro 5. Estadísticos de ajuste y parámetro del modelo de número de árboles de pino (NAP)..	36
Cuadro 6. Estadísticos de ajuste y parámetros estimados para modelos de área basal de pino (2) y (3) ajustados de manera simultánea.	37
Cuadro 7. Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos de volumen pino (6) y (7) ajustados de manera simultánea y del modelos de volumen de hojosas.....	39
Cuadro 8. Tabla de crecimiento y rendimiento promedio de <i>Pinus patula</i> para los índices de sitio 20, 25 y 30 m con una densidad inicial de 2000 árboles por ha y 0% de hojosas.	41
Cuadro 9. Tabla de crecimiento y rendimiento para <i>Pinus patula</i> y hojosas para los índices de sitio 25 y 30 m con proporción de área basal de hojosas de 4% a los 5 años.	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	18
Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo dentro del Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono Atopixco.	21
Figura 3. Cambios en la proporción del área basal de hojosas en el tiempo en bosques <i>Pinus patula</i> en Zacualtipán, Hidalgo	25
Figura 4. Relación entre el área basal y el volumen de hojosas.	29
Figura 5. Familia de curvas de crecimiento en altura dominante para los modelos Weibull anamórfico (a), Chapman-Richards polimórfico (b), Bass anamórfico (c) y Hossfeld IV polimórfico (d).	33
Figura 6. Proyección del área basal de pino en el índice de sitio promedio (IS 30) para cinco proporciones iniciales de área basal de hojosas, con 8 m² de área basal total a la edad de 5 años.	38
Figura 7. Incremento medio anua (ICA) e incremento corriente anual (IMA) para los IS (15, 20, 25, 30 y 35) en rodales de <i>Pinus patula</i> en Zacualtipán, Hidalgo.	42
Figura 8. a) Volumen de pino en el IS 30, b), c) y d) volumen total en los IS 15, 25 y 35, respectivamente, para tres porcentajes de hojosas a los cinco años de edad.	45
Figura 9. Biomasa total en los IS 15, 20, 25, 30 y 35 para dos porcentajes iniciales de hojosas a la edad de 5 años.	46

1. INTRODUCCIÓN

Las formas en que los bosques contribuyen al bienestar humano son variadas y de amplio alcance, ya que juegan un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida y la generación de medios de subsistencia. Además, proveen servicios ambientales de primordial importancia como el aire y agua limpios, la conservación de la biodiversidad y la mitigación de los efectos del cambio climático (FAO, 2015).

Para el desarrollo de esquemas de manejo de bosques que garanticen la provisión de bienes y servicios que estos recursos proporcionan, es necesario contar con información confiable y suficiente de sus características y procesos (Brosovich, 1998). Particularmente, en bosques orientados a la producción de recursos maderables, las decisiones de manejo deben estar basadas en parámetros cuantitativos de los rodales que permitan conducir las acciones hacia objetivos determinados.

Los sistemas de crecimiento y rendimiento (SCR) son una herramienta cuantitativa confiable para predecir el comportamiento de variables de estado de los bosques con manejo forestal (Santiago-García *et al.*, 2015). Al permitir realizar simulaciones de crecimiento del bosque los SCR permiten definir alternativas de manejo, tales como programar el plan de cortas, el abastecimiento de materia prima a la industria, implementar aclareos, estimar ingresos económicos futuros y son de utilidad para cuantificar y proyectar biomasa y carbono aéreo (Clutter *et al.*, 1983; Pretzsch, 2009).

Desde la década de los 1980's los bosques de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo han estado bajo manejo forestal con tendencia a la formación de masas coetáneas de *Pinus patula*, mediante la aplicación del Método de Desarrollo Silvícola (MDS). Sin embargo, la alta productividad de los

sitios y la baja intensidad de las labores silvícolas han propiciado la aparición de especies de hojosas que compiten con la especie de interés comercial.

El área de estudio es el Sitio de Monitoreo Intensivo del Carbono (SMIC) atopixco, en Hidalgo. Este tiene entre sus objetivos, determinar el efecto del manejo forestal sobre la productividad de los rodales y dinámica del carbono, así como las tasas de acumulación (Ángeles *et al.*, 2015). Para evaluar la contribución de los bosques al ciclo del carbono, es necesario conocer la dinámica de crecimiento de las masas forestales y su potencial de acumulación y producción de biomasa (Cutini *et al.*, 2013).

En los bosques de Zacualtipán Hidalgo, se han realizado investigaciones relacionadas con el crecimiento de los bosques de *P. patula* en volumen (Santiago-García *et al.*, 2013; Santiago-García *et al.*, 2015) y con biomasa y carbono (Aguirre-Salado *et al.*, 2009; Figueroa-Navarro *et al.*, 2010; Soriano-Luna *et al.*, 2015). Sin embargo, para estimar el incremento en volumen el primer estudio en el área, se concentró en una superficie pequeña (100 ha del Ejido “La Mojonera”), en tanto que para biomasa y carbono se desarrolló ecuaciones alométricas de predicción a nivel de árbol y en el caso de Aguirre-Salado *et al.* (2009) la estimación se realizó a partir de sensores remotos.

Sin embargo, pocas veces se cuenta con bases de datos que cubran una amplitud de condiciones de crecimiento bajo un régimen de manejo, y que además se hayan medido en más de una ocasión, tal es el caso del presente estudio. Contar con esta información permitió generar un sistema de ecuaciones de crecimiento y de rendimiento para *Pinus patula* en la región de Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo con un mayor espectro de aplicación. El sistema incluyó el efecto de la presencia de hojosas para modelar la competencia interespecífica entre los grupos de especies, además de ecuaciones de biomasa aérea arbórea para pino y hojosas a partir de las cuales se puede conocer la dinámica del carbono en estos rodales.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Generar un sistema de crecimiento y rendimiento maderable explícito en bosques bajo manejo de *Pinus patula* en la región de Zacualtipán, Hidalgo, que permita estimar la producción maderable, y modelar la dinámica del carbono aéreo arbóreo en los rodales.

1.1.2. Objetivos específicos

- a) Determinar la productividad de los rodales basado en los modelos de altura dominante (*HD*) e índice de sitio (*IS*).
- b) Incluir en el sistema un componente para modelar la competencia entre el pino y especies de hojosas.
- c) Generar modelos para determinar el comportamiento de la acumulación de biomasa aérea arbórea, a través de los cuales se pueda conocer la dinámica del carbono almacenado.
- d) Generar y ajustar ecuaciones de predicción y proyección del crecimiento de rodales para las variables dasométricas que definen el rendimiento maderable de pino y hojosas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Funciones de crecimiento

2.1.1. Concepto de crecimiento

El crecimiento biológico es el proceso natural de desarrollo de los seres vivos, caracterizado por el aumento gradual de su tamaño (Santiago, 2009). El crecimiento de organismos (individuos o un grupo de ellos con características similares) tiene un comportamiento común, es decir, organismos de la misma especie y edad tendrán una curva de crecimiento similar. En cuanto al desarrollo de los árboles, el crecimiento ocurre simultáneamente en distintas partes dando como resultado crecimiento longitudinal ya sea en la parte aérea en la altura y longitud de las ramas, así como en las raíces y crecimiento en grosor (madera y corteza) al aumentar el diámetro (Diéguez *et al.*, 2003). Factores como la genética de cada especie, las condiciones ambientales a las que se ve sometido (clima, suelo, características topográficas y competencia) y la interacción de estos dos factores afectan el crecimiento de la masa forestal. Algunos de estos elementos pueden ser controlados para contribuir al crecimiento del arbolado, un ejemplo es la implementación de tratamientos silvícolas.

En el ámbito forestal, el crecimiento se refiere al cambio (aumento) de un atributo o característica de un sujeto de estudio o población (diámetro normal, volumen, biomasa), referido a una unidad de tiempo (Torres y Magaña, 2001). Mientras que el rendimiento describe las dimensiones totales al final de un periodo determinado.

2.1.2. Modelos de crecimiento

Los modelos (funciones) de crecimiento y rendimiento son abstracciones de la realidad que pretenden captar el comportamiento de las especies forestales en ecuaciones matemáticas capaces

de describir la dinámica actual del bosque y de proyectar hacia el futuro las variables de estado del rodal. Están basados en relaciones entre distintas variables que explican de cierta manera el comportamiento del crecimiento. Para ciertos atributos de interés es común ver la implementación de tablas de crecimiento y rendimiento, ya que la interpretación es más directa y el uso es equivalente (Davis y Johnson, 1987).

Al implementar el uso de modelos se deben definir ciertas especificaciones y requerimientos. Torres y Magaña (2001) mencionan que es necesario establecer el propósito del estudio y diseñar, de ser necesario, un esquema de muestreo para obtener la información de campo. Posteriormente se lleva a cabo el ajuste de los modelos utilizando análisis exploratorios de los datos y una calibración final de los mismos. Por último, es necesario realizar una validación de las ecuaciones, en esta fase se comprueba el comportamiento de los modelos contra lo que teóricamente se conoce del comportamiento del crecimiento.

Los modelos pueden construirse utilizando información en diversas escalas y para distintos niveles de acuerdo con los requerimientos del sistema de manejo que se desee implementar. Son útiles para conocer estados actuales y futuros del rendimiento, crecimiento y estructura de rodales sometidos a un régimen silvícola específico. Además, dichos modelos son la base de los sistemas de crecimiento y rendimiento cuyo objetivo es predecir condiciones futuras del área bajo manejo con una amplia variedad de condiciones.

2.1.3. Tipos de modelos de crecimiento

Los modelos de crecimiento reflejan diferentes filosofías de modelado y niveles de complejidad matemática, se clasifican según el nivel de detalle que proporcionan; clasificándose en general tres categorías (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009; Vanclay, 1994).

- a) Modelos de rodal completo o de masa. Se caracterizan porque la solución de la ecuación o ecuaciones que integran el sistema proporciona la estimación del volumen por unidad de área. En estos modelos la unidad básica del modelaje la constituye el rodal. La ventaja principal de estos modelos es que requieren poca información para las simulaciones, por lo que son los más sencillos y a la vez más robustos. En la mayoría de las situaciones este tipo de modelo probablemente sea el más adecuado para la planificación del manejo de rodales coetáneos y plantaciones forestales.
- b) Modelos de distribuciones por clases de tamaños. Permiten simular el crecimiento en cada clase diamétrica, la cual se modela estimando el número de árboles y volumen por unidad de superficie para cada categoría. El número de árboles en cada clase se estima mediante el uso de una función matemática que proporcione la frecuencia relativa, y el rendimiento total se obtiene sumando los volúmenes correspondientes a cada una de ellas. Estos modelos proporcionan información relacionada con la estructura del rodal. Además de poder predecir las existencias volumétricas; también predicen la calidad de sus productos.
- c) Modelos de árboles individuales. Constituyen enfoques más detallados que utilizan al árbol individual como unidad básica del modelado. Predicen el crecimiento de cada árbol del rodal introduciendo un factor de competencia, que puede ser dependiente o no de la distancia. Estos modelos proporcionan información detallada de la estructura y dinámica del rodal, incluyendo la distribución del volumen por clases de tamaño

Existen otros tipos de modelos que se basan en principios diferentes, como los de sucesión, los que simulan procesos y los de simulación de ciclos de nutrientes (Torres y Magaña, 2001). También puede hablarse de modelos estáticos, dinámicos, determinísticos y estocásticos dependiendo del enfoque del modelado (Diéguez-Aranda *et al.*, 2009).

2.2. Sistema de crecimiento y rendimiento

Al conjunto de modelos matemáticos utilizados para predecir y proyectar variables de interés para el manejo forestal, a través del tiempo, se les conoce como sistema de crecimiento y rendimiento (SCR). Tienen gran importancia dentro del manejo forestal porque proporcionan una base técnica para la implementación de acciones como regulación de cortas, análisis financieros, cálculo de la posibilidad y alternativas de uso de la tierra (Zepeda, 1990).

De acuerdo con Torres y Magaña (2001), la predicción del crecimiento y rendimiento se puede realizar de dos formas, mediante los sistemas explícitos, en donde se obtiene directamente el valor de la variable de interés y los implícitos que utilizan uno o más modelos para predecir variables de manera explícita, a partir de las cuales se obtiene la condición futura del rodal.

Los componentes principales de un SCR explícito son las funciones de crecimiento relacionadas con altura dominante e índice de sitio, volumen, área basal y número de árboles (Galán *et al.*, 2008). Sin embargo, es posible introducir al sistema funciones que modelen biomasa, carbono y otras variables de interés (Clutter *et al.*, 1983).

2.2.1. Índice de sitio y altura dominante

La calidad de sitio o calidad de estación es el potencial de producción de madera de un terreno forestal para una especie determinada, dado por los factores edáficos, climáticos y bióticos asociados a este terreno (Martínez-Salvador *et al.*, 2013; Clutter *et al.*, 1983). Se asume que cuanto más favorables son estas condiciones, el potencial de producción es mayor.

Existen diversas metodologías para obtener la calidad de sitio de un rodal, estas se clasifican de manera general en directas e indirectas. Las primeras evalúan la calidad del sitio a través de una

característica de los individuos de la especie de interés, se basan en registros históricos de rendimientos, datos de volumen del rodal y estimaciones de altura. Las otras utilizan las relaciones interespecíficas (especies indicadoras), características de la vegetación menor y el uso de factores edáficos, climáticos y topográficos (Clutter *et al.*, 1983).

Una forma directa de medir la productividad de un rodal es utilizando índices de sitio. Es un método popular y práctico por su simplicidad y precisión (Torres y Magaña, 2001). Este método, al igual que todos los directos se basan en alguna característica de la especie de interés, por lo que, lo primero es definir esta característica.

En bosques dedicados a la producción maderable, podría considerarse razonable usar como característica el volumen, ya que es la variable de mayor interés. Sin embargo, esta variable es afectada por factores ajenos a la calidad del sitio, como la densidad del rodal. Lo mismo ocurre con otras como el diámetro promedio y la altura promedio.

Una variable que ha resultado indicadora de la productividad del rodal, cuyo comportamiento no se ve abruptamente afectado por el comportamiento de la densidad del rodal y las cortas intermedias ha sido la altura media dominante (Cruz, 2007), comúnmente llamada altura dominante del rodal. Debido a ello, es la variable más usada para determinar la calidad del sitio con métodos directos.

Para estimar la altura dominante de un rodal se han usado varias alternativas, la primera de ellas, promediando las alturas de los árboles dominantes y codominantes. La segunda, usando una proporción (20%) de los árboles más grandes por ha, es decir, con mayor diámetro. Finalmente el uso de una cantidad definida de árboles, por ejemplo de 100 a 200 árboles con mayor diámetro (Assmann, 1970). Para superficies menores de una hectárea se obtiene el número de árboles

proporcionalmente a la superficie, es decir, si se tiene un sitio de 0.1 ha entonces se deberán seleccionar 10 árboles en lugar de 100, ya sea con el criterio de mayor altura o mayor diámetro.

La altura de los árboles habrá de variar con el paso del tiempo, por lo que también lo hará la altura dominante, de esta forma, su valor habrá de ser diferente en diferentes momentos para una misma calidad de sitio. Este inconveniente se ha resuelto al definir el índice de sitio como el valor de la altura dominante a una determinada edad de referencia, llamada edad base. Es evidente que para conocer el IS se debe conocer la altura dominante a la edad base. La importancia de esta variable en el SCR radica en que la productividad es estimada indirectamente al utilizar modelos de crecimiento de altura dominante (Martín-Benito *et al.*, 2008).

2.2.2. Construcción de curvas de índice de sitio

La altura dominante es una variable cuantitativa continua, por lo tanto, también lo es el índice de sitio. Es por esto que puede haber tantos índices de sitios como rodales en un bosque. Para reducir estas posibilidades se recurre a las familias de índice de sitio, de esta forma, se puede cubrir el intervalo de calidades de sitio en el área de interés.

Existen dos enfoques en la construcción de las familias de curvas de índice de sitio, las de tipo anamórficas y las polimórficas. Las anamórficas, son aquellas familias de curvas donde la altura ajustada del arbolado dominante en una curva a cualquier edad representa una proporción constante de la altura del arbolado de esa misma edad en cualquier otra curva (Clutter *et al.*, 1983). Lo anterior lleva a que el punto de inflexión de cada curva se presente en el mismo punto de edad (De la Fuente, 1998). El supuesto en el que descansan los modelos que resultan en este tipo de curvas es que las tasas relativas de crecimiento entre sitios permanecen constantes pero su potencialidad máxima varía (Santiago, 2009). Por el contrario, las curvas polimórficas son familias de curvas donde las

tasas relativas de crecimiento entre sitios no permanecen constantes y por lo tanto existen distintos patrones de crecimiento para cada índice de sitio, no obstante, su potencialidad máxima es única (Avery y Burkhart, 1983).

Existen varios métodos para la construcción de las familias de curvas. El método de la curva guía es un ejemplo de técnica, en donde se obtienen familias de curvas anamórficas si se utiliza el principio de proporcionalidad, sin embargo, este mismo método puede resultar en familias de curvas polimórficas (Clutter *et al.*, 1983). Con esta técnica se ajusta la tendencia promedio de las alturas dominantes en todo el intervalo de edad para obtener una curva denominada curva guía, a partir de la cual se construye una familia de curvas por arriba y por debajo de ella, proporcionales entre sí (Santiago, 2009).

Otro de los métodos más conocidos y utilizados fue presentado por Bailey y Clutter (1974) quienes proponen un mecanismo para derivar ecuaciones dinámicas conocido como Método de Diferencia Algebraica (ADA por sus siglas en inglés). Este método consiste en la sustitución de un parámetro del modelo en una condición base, de tal manera que se pueda expresar en función del sitio. Se caracteriza porque al ajustar los modelos, puede variar la potencialidad máxima o las tasas de crecimiento, pero no ambas. Lo anterior tiene como resultado curvas que pueden ser de tipo anamórfico y presentar tasas de crecimiento constantes y asíntotas variables o pueden ser de tipo polimórfico con tasas de crecimiento variables y asíntotas constantes.

Una forma extendida del método anterior es el enfoque que se conoce como diferencia algebraica generalizada (GADA), este tipo de ecuaciones permiten variar la potencialidad máxima, así como las tasas de crecimiento e incluso ambas simultáneamente, lo que origina un patrón conocido como polimorfismo asintótico (polimorfismo complejo) puesto que más de un parámetro en el modelo

depende de la calidad de estación, de este modo las curvas son de tipo polimórfico y cuentan con múltiples asíntotas (Cieszewski y Bailey, 2000).

Lo anterior origina curvas de índice de sitio más flexibles, por lo que les es posible captar el comportamiento del crecimiento en altura mejor que los modelos que generan curvas anamórficas o polimórficas. La estructura lógica del crecimiento en altura se mantiene al utilizar tanto el enfoque ADA como GADA, además, las ecuaciones son invariantes a cambios en la edad base.

2.2.3. Área basal

La densidad es una medida sobre el grado de ocupación del terreno o del agrupamiento de los árboles (Reyes-Muñoz *et al.*, 2011). La densidad puede expresarse a través de medidas absolutas o de medidas relativas. Las medidas relativas enfocan la densidad como medida de la competencia entre árboles vecinos: a mayor espacio disponible, mayor velocidad de crecimiento de un árbol. En tanto que, las medidas absolutas, dan una medida del agrupamiento de los árboles. Las medidas de densidad que comúnmente son utilizadas son el número de árboles por hectárea y el área basal por hectárea (Torres y Magaña, 2001).

El área basal de un árbol es el área de la sección transversal medida a 1.3 m de altura, es decir, el área de la sección transversal del diámetro normal. Entonces, el área basal por hectárea es la suma de las áreas basales de los árboles presentes en dicha hectárea.

Como parte del desarrollo de un SCR es importante conocer el área basal de un rodal, porque se encuentra altamente relacionada con el volumen total. Sin embargo, es necesario que dichas medidas de densidad absoluta sean consideradas en conjunto con otras variables que permitan medir el crecimiento y rendimiento de un rodal.

2.2.4. Número de árboles

Otra medida de densidad absoluta es el número de árboles promedio en un área determinada. Esta medida de densidad absoluta es frecuentemente usada para desarrollar modelos de crecimiento asociada a variables como sitio y edad (Torres y Magaña, 2001), además es usada también como referencia de la densidad. Es una medida simple y directa, sin embargo, estas características hacen que no sea un indicador pertinente de competencia a menos que sea tomada a una determinada edad o calidad de sitio, de otro modo no es comparable como medida de densidad con otras áreas (Zeide, 2005).

A pesar de lo anterior, el número de árboles puede ser un indicador de la mortalidad en el rodal, debido a que la mortalidad es la variable más complicada de evaluar si no se cuenta con datos de sitios permanentes, incluso si están disponibles resulta complicado evaluar el cambio en número de individuos a través del tiempo (Torres y Magaña, 2001).

La mortalidad se define como la proporción de individuos muertos en la población a través del tiempo. Las funciones de mortalidad regularmente predicen el número de árboles a una edad de proyección (NA_2), a partir del número actual de árboles (NA_1), de la edad inicial (E_1) y de la edad de proyección (E_2) (Torres y Magaña, 2001).

2.2.5. Volumen

Medir directamente el volumen de un árbol resulta en una tarea difícil y costosa. Es por ello, que se recurre a las funciones de volumen individual (árbol) para relacionar el volumen con otras variables más fáciles de medir, generalmente, diámetro y altura (García, 1995). Además de incluir las variables anteriores, también se han incluido variables relacionadas con el volumen de manera

indirecta como el factor de forma (Spurr, 1952). A nivel árbol es posible obtener estimaciones del volumen total, volumen de fuste y volumen comercial.

A nivel rodal la estimación de volumen se lleva a cabo mediante la suma del volumen individual de cada árbol. O bien usando variables como área basal y altura dominante (Torres y Magaña, 2001), para ello, se construyen las funciones de volumen por hectárea.

Las funciones de volumen por hectárea son útiles cuando no se tiene la información de los árboles individuales. Un ejemplo podría ser al determinar el área basal directamente con el método de Bitterlich. Otro es cuando el área basal y altura corresponden a la proyección de un modelo de crecimiento (García, 1995).

2.2.6. Biomasa y carbono

Los ecosistemas forestales representan un valioso almacén de carbono para el planeta gracias a su efecto de reducción de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO_2). Gracias al proceso de fotosíntesis y respiración, se pueden almacenar grandes cantidades de carbono tanto en la vegetación como en el suelo (Domínguez, 2011).

Cuando estos grandes reservorios son perturbados, las existencias de carbono contenidas en la biomasa aérea son retiradas, ya sea para ser transformadas mediante el aprovechamiento forestal en productos maderables o liberadas mediante combustión o descomposición microbiana (Ordóñez *et al.*, 2008).

De la misma manera que en la estimación de otros componentes de un SCR, existen dos tipos de métodos para cuantificar la biomasa por árbol: directos e indirectos. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar cada componente, sin embargo, los altos costos de esta práctica la hacen

poco viable (Díaz-Franco *et al.*, 2007). El desarrollo de ecuaciones alométricas es el método estándar para la estimación de la biomasa aérea de árboles, sitios o rodales (Brown, 1997), para construirlas es necesario mediciones de peso fresco y peso seco de cada uno de los componentes de la biomasa en el árbol.

Las ecuaciones alométricas son modelos importantes que estiman la biomasa (e indirectamente el carbono) para ecosistemas terrestres. Dichas ecuaciones son útiles no solo para estimar el carbono almacenado, sino que además estiman de manera parcial la productividad primaria de muchos tipos de ecosistemas. Otros métodos, incluyen la multiplicación del volumen del fuste por la densidad básica de la madera, con la biomasa de ramas y hojas integrada mediante otros enfoques. Además, el volumen del fuste también se puede multiplicar por factores de expansión de biomasa a nivel árbol o rodal (Návar, 2010).

Uno de los métodos de estimación de la cantidad de CO_2 almacenado y que puede ser liberado a la atmósfera o extraído es mediante la estimación de la biomasa (Clark y Clark, 2000). Esta variable es útil en un SCR ya que mediante ella es posible llevar a cabo una mejor planificación del aprovechamiento maderable y es otro indicador para determinar la productividad de los bosques.

La estimación del carbono a nivel de árbol y rodal, a través de la biomasa, se realiza mediante el uso de un factor de proporción de carbono (factor de expansión de carbono o fracción de carbono) el cual indica la cantidad de carbono por cada $Mg\ ha^{-1}$ de materia seca de biomasa (IPCC, 2006). A nivel rodal las estimaciones se pueden realizar a través de funciones de crecimiento en un SCR, esto mediante el uso de variables relacionadas, como el área basal y altura dominante, las cuales corresponden a la proyección de un modelo de crecimiento de estas variables.

2.2.7. Componente de hojosas

El crecimiento de un árbol o rodal está regulado por diversos factores, entre ellos, la variedad de especies presentes, su edad, la calidad de sitio, el número de individuos por unidad de área y la competencia existente por la disponibilidad de recursos (Curtis, 1970). Cuando se desarrollan sistemas de crecimiento y rendimiento para una especie dominante, como *Pinus patula*, la cual se desarrolla con otras especie, la complicación resulta en incorporar en el sistema la competencia interespecífica y su efecto sobre la variable de interés, generalmente, volumen.

Una de las formas más usadas para predecir el crecimiento de rodales con mezcla de especies, ha sido la inclusión en los modelos de una medida, directa o indirecta, de la competencia en el rodal (Torres-Rojo, 2000). Normalmente, se usan los denominados índices de competencia, los cuales, son una medida del efecto que producen los árboles vecinos en el crecimiento de un individuo dentro de un rodal (Vanclay, 1994).

Otra forma es mediante el uso de medidas de densidad, las cuales dan una idea del grado de ocupación del rodal, y son un indicador del grado de aglutinamiento del arbolado presente. Como una medida de densidad, se puede incorporar la proporción de área basal de hojosas en una ecuación de crecimiento a nivel rodal para explicar la disminución en el volumen de la plantación de pino a medida que aumenta el área basal de madera dura (Martín y Brister, 1999), de esta forma se puede realizar la predicción del crecimiento y rendimiento usando modelos a nivel rodal (Valles-Gándara y Valadez-Castro, 2006).

2.3. Especie de interés comercial

La vegetación arbórea predominante del área de estudio corresponde a bosque mesófilo de montaña, bosque de pino y bosque de pino-encino. La especie de mayor interés comercial es *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal & Chamisso.

*Pinus patula*¹. Es un árbol cuya altura oscila entre 30 y 35 m y exhibe entre 50 y 90 cm de diámetro normal. En cuanto a su forma, presenta tronco recto y libre de ramas hasta los 20 m, una copa abierta y circular y una raíz profunda y poco extendida. El crecimiento es rápido, tiene rendimientos de 20 m³/ha/año aunque entre los 30 y 35 años tiene una desaceleración ligera del crecimiento. Es una especie perennifolia de hojas aciculadas cuyo renuevo ocurre en dos periodos, febrero conocido como primer internudo y mayo cuando comienza la aparición de nuevas hojas y la caída de las anteriores, conocido como segundo internudo. Cercano a este mismo periodo se presenta la floración entre los meses de enero y abril. Los frutos son conos serótinos originados gracias a la polinización anemófila originada alrededor del mes de marzo.

Las altitudes en las que se puede encontrar comprenden un rango de 1500 a 3100 m, en sitios con pendientes moderadas y hasta de 45°. Los suelos son de textura arenosa o arcillosa con escasa o nula pedregosidad, bien drenados y con humedad aparente, de color café con variantes hasta amarillo y rojo principalmente en los horizontes profundos, aunque no limitado a ellos. Se desarrolla en zonas templadas con exposición norte o en aquellas donde se presenta una cantidad abundante de niebla durante el año. Las temperaturas en donde se encuentra distribuida la especie van desde -14° a 40° C. Los sitios tienen precipitaciones de 600 a 2500 mm.

¹ CONAFOR & CONABIO. s/f . SIRE. Fichas Técnicas Paquete tecnológico. *Pinus patula* Schl. et Cham. <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus%20patula.pdf>

Se encuentra principalmente en bosques de pino y pino-encino y tiene una distribución de manera natural sobre la Sierra Madre Oriental, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre de Oaxaca en los territorios de Oaxaca, Tlaxcala, Distrito Federal, Querétaro, Tamaulipas, Nuevo León, Hidalgo, Puebla y Veracruz en un intervalo latitudinal entre 24° hasta 17 ° latitud N y 97° a 99° longitud W.

La madera obtenida de *P. patula* es de buena calidad y con una buena resistencia. Por lo anterior se prefiere su uso para postes, vigas, durmientes, etcétera. Otros usos son en la elaboración de acabados para interiores y exteriores. Además, es utilizada para fabricar papel, gracias a la longitud de sus fibras.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono Atopixco, ubicado en el municipio de Zacualtípán de Ángeles, Hidalgo. El área está delimitada por un polígono de 3 × 3 km (coordenadas extremas 20°40'17" y 20°34'51" N, 98°40'07" y 98°34'22" W) que se encuentra dentro de los ejidos Atopixco, La Mojonera, El Reparó, Tzincuatlán, Zahuastipán, Santo Domingo y pequeñas propiedades (Figura 1).

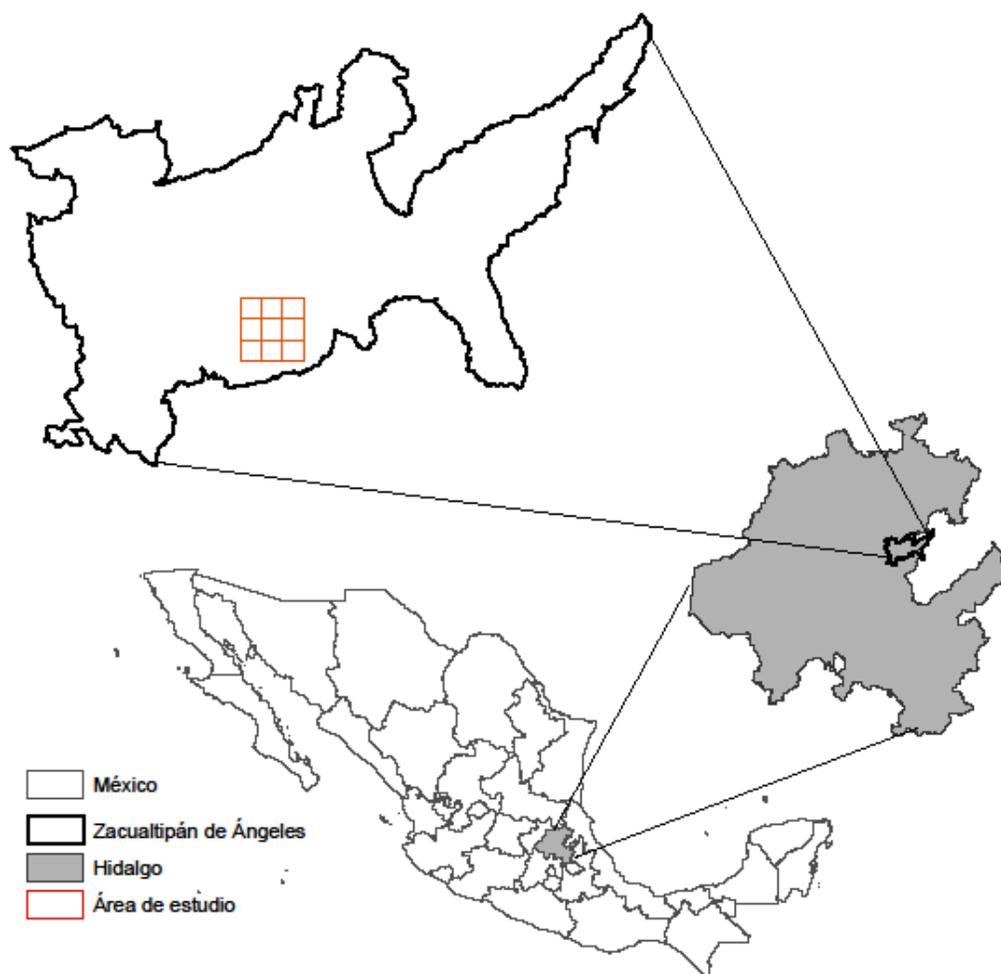


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

La vegetación natural predominante corresponde bosque mesófilo de montaña, bosque de pino y bosque de pino-encino. Las principales especies arbóreas que se encuentran son: *Pinus patula*, *Quercus crassifolia*, *Q. affinis*, *Q. laurina*, *Q. Sartori*, *Q. excelsa*, *Q. xalapensis*, *Clethra mexicana*, *Cupressus pringlei*, *Magnolia schiedeana*, *Cornus disciflora*, *Viburnum spp.*, *Cleyera theaoides*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serótina*, *Vaccinium leucanthum*, *Liquidambar styraciflua*, *Fagus grandifolia subsp. Mexicana*, *Podocarpus reichei*, *Cercis canadensis*, etc. (Ángeles-Pérez *et al.*, 2005).

El clima es C(m), es decir, un clima templado húmedo con abundantes lluvias en verano, con temperatura media anual de 13.5 °C y precipitación de 2050 mm. El suelo de las partes bajas es Feozem háplico (Hh), con una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica, mientras que en las partes con mayor pendiente se encuentra el Regosol calcárico (Rc).

En las últimas tres décadas, la gestión forestal en el área de estudio se ha orientado hacia el cultivo de rodales puros coetáneos de *P. patula* (Aguirre-Salado *et al.*, 2009), a través del Método de Desarrollo Silvícola con base en el método de regeneración de Árboles Padres. A pesar de este hecho, en la toma de datos se encontró presencia de diversas especies de hojosas, debido a que las labores silvícolas se orientan fundamentalmente hacia aclareos no comerciales ligeros durante los primeros años después de la regeneración natural, seguidos de aclareos comerciales ligeros sin control de vegetación competidora.

3.2. Obtención de datos

Los datos se colectaron en tres inventarios (2013, 2014 y 2016) de 40 parcelas permanentes de medición forestal similares a las utilizadas por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS)

de la Comisión Nacional Forestal, es decir, 40 conglomerados compuestos por cuatro sitios de 400 m² cada uno.

Los conglomerados se encuentran ubicados de la forma siguiente: en el cuadro central de 1 km² se ubicaron 16 conglomerados dispuestos sistemáticamente; en los 8 km² restantes, se estableció un conglomerado en el centro de cada uno; finalmente, se establecieron 17 unidades más, localizadas en rodales de diferentes edades para obtener una cronosecuencia de casi 35 años.

Las características de los 4 sitios en cada conglomerado en muchos casos son diferentes, como en el caso del año en que fueron cosechados, por lo que se consideró a cada uno de ellos como una unidad de muestreo independiente. En la Figura 2 se observa la distribución de los sitios de muestreo.

A todos los individuos con diámetro de 5 cm o más se les midieron las variables: altura total de cada árbol (H , m), diámetro con corteza a 1.3 m (D , cm) y edad del sitio (E , años transcurridos desde la corta de regeneración). Las variables de estado estimadas a partir de las variables colectadas fueron: altura dominante promedio (HD , m), área basal de pino (ABP , m²), volumen de pino (VP , m³), biomasa aérea arbórea de pino (BP , Mg), carbono en la parte aérea de pino (CP , Mg), número de árboles vivos de pino (NAP), área basal de hojosas (ABH , m²), volumen de hojosas (VH , m³), biomasa aérea arbórea hojosas (BH , Mg), y carbono en la parte aérea de hojosas (CH , Mg).

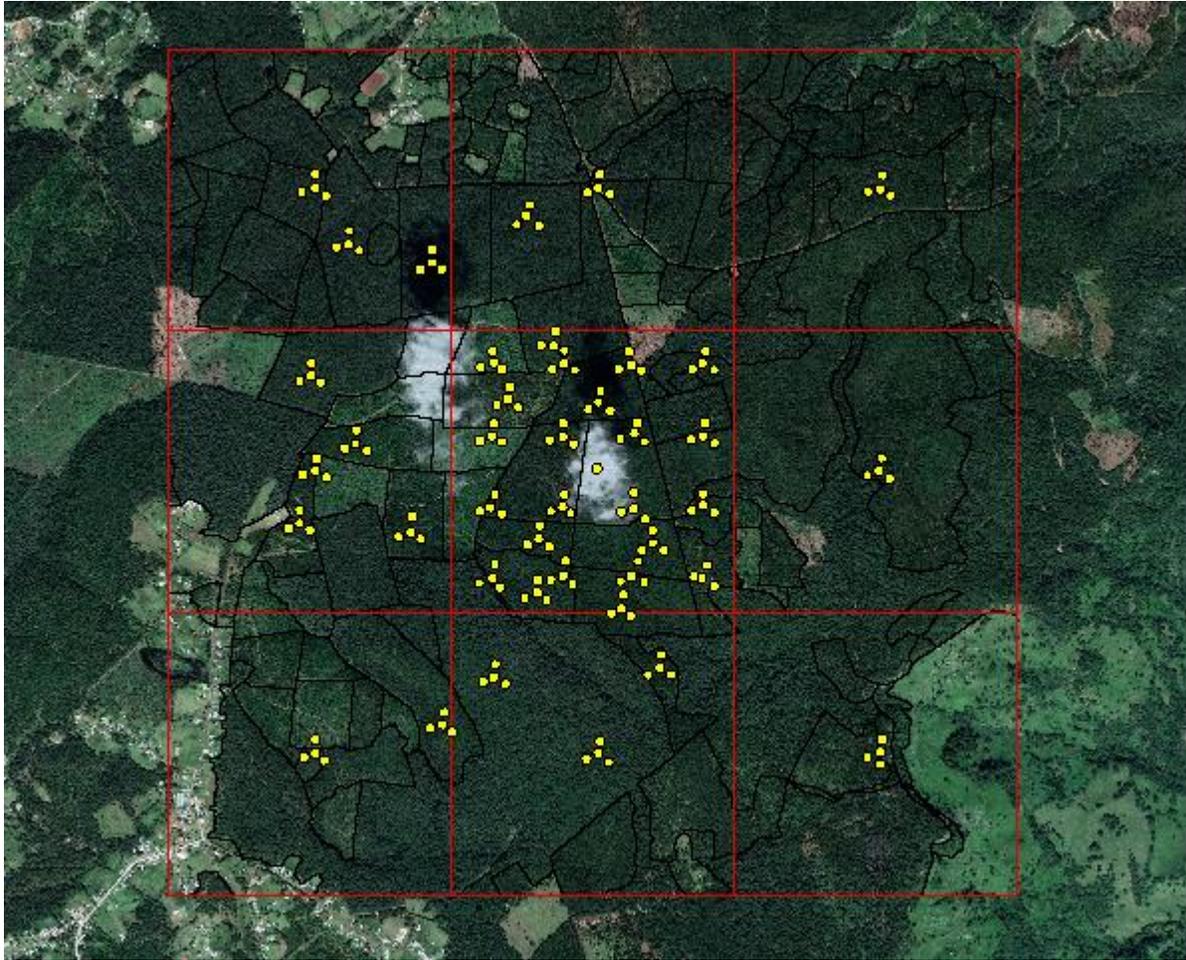


Figura 2. Distribución de los sitios de muestreo dentro del Sitio de Monitoreo Intensivo de Carbono Atopixco.

3.3. Volumen y biomasa de cada árbol

Para la obtención del volumen de cada árbol se usaron las ecuaciones de volumen total del Sistema Biométrico Forestal (SiBiFor, Vargas-Larreta *et al.*, 2017), generadas para la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR 1302 Zacualtipán-Molango) en la que se encuentra el área de estudio, en tanto que para biomasa se usó las ecuaciones generadas por (Soriano-Luna *et al.*, 2015). A continuación se muestran las ecuaciones usadas para el volumen total árbol y biomasa total de *Pinus patula*.

$$v = 0.0000253256 \cdot D^{1.693942082} \cdot H^{1.417508987} + 0.0000680 \cdot D^2$$

$$b = e^{-4.554805} \cdot (D^2 \cdot H)^{1.047218}$$

donde v y b : volumen y biomasa total de cada árbol, respectivamente, D : diámetro normal a 1.3 m, H : altura total del árbol.

3.4. Altura dominante

Generalmente, el primer paso para desarrollar un SCR es conocer la productividad del rodal, para ello se emplean ecuaciones de índice de sitio. La variable que se utilizó para determinar la productividad de cada rodal fue la altura dominante, definida como la altura de los cien árboles más altos por ha. En el ajuste de los modelos de HD se usaron 278 pares de datos no traslapados que corresponden al promedio de las alturas de los árboles dominantes (4 en cada sitio) y edades, referidas al año en el cual se intervino el rodal para lograr la regeneración, las cuales variaron de 2 a 34 años.

El método de la diferencia algebraica se utilizó para generar la familia de curvas de altura dominante. El método consiste en desarrollar, en forma de diferencia, un modelo que relacione la altura dominante con la edad. Los datos deben provenir de análisis troncales o, como en esta investigación, de sitios de muestreo permanentes, de tal forma que se cuente con al menos dos mediciones del arbolado en diferentes periodos. Para ejemplificar el método se deriva la forma anamórfica a partir del modelo de Schumacher.

El primer paso es elegir un modelo de ajuste promedio que relacione las variables altura dominante y edad, como ya se mencionó, el modelo de Schumacher que tiene la siguiente forma:

$$HD = \beta_0 \cdot e^{-\beta_1 \cdot (1/E)}$$

Donde HD : altura dominante (m), E : edad del rodal (años), β_0 y β_1 : parámetros del modelo.

El modelo se plantea para dos mediciones consecutivas de altura dominante (HD_1 y HD_2) y edad (E_1 y E_2).

$$HD_1 = \beta_0 \cdot e^{-\beta_1 \cdot (1/E_1)} \qquad HD_2 = \beta_0 \cdot e^{-\beta_1 \cdot (1/E_2)}$$

Se identifica el parámetro que representa la hipótesis de crecimiento, en este caso β_0 ya que es el que hace variar la asíntota para generar curvas anamórficas, y se resuelve con respecto a dicho parámetro.

$$\beta_0 = \frac{HD_1}{e^{-\beta_1 \cdot (1/E_1)}}$$

Finalmente, se sustituye la solución anterior en HD_2 para obtener el modelo de altura dominante a la edad proyectada.

$$HD_2 = HD_1 \cdot e^{-\beta_1 \cdot (1/E_2 - 1/E_1)}$$

Si se considera que el índice de sitio se define como la altura dominante que se logra a la edad base (E_B), entonces se puede estimar el IS con el modelo y asignar la calidad de sitio a los rodales, sustituyendo E_2 por E_B y HD_2 por IS como se muestra en la siguiente ecuación.

$$IS = HD_1 \cdot e^{-\beta_1 \cdot (1/E_B - 1/E_1)}$$

Donde IS : Índice de sitio del rodal (m), E_B : edad base de (años), lo demás se definió previamente.

Se ajustaron de manera simultánea las ecuaciones de predicción y proyección para los modelos de Schumacher, Bass, Weibull, Hosfeld IV y Chapman-Richards para curvas anamórficas y polimórficas los cuales se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos de predicción y proyección anamórficos y polimórficos de altura dominante ajustados.

Modelo	Predicción	Proyección anamórfico	Proyección polimórfico
Schumacher	$HD_1 = b_0 \cdot e^{-b_1 \cdot (1/E_1)}$	$HD_2 = HD_1 \cdot e^{-b_1 \cdot (\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1})}$	$HD_2 = b_0 \cdot \left(\frac{HD_1}{b_0}\right)^{\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}$
Hossfeld IV	$HD_1 = \frac{b_0}{1 + e^{b_1 \cdot e^{-b_2 \ln E_1}}}$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left[\frac{1 + e^{b_1 \cdot e^{-b_2 \ln E_2}}}{1 + e^{b_1 \cdot e^{-b_2 \ln E_1}}} \right]$	$HD_2 = \frac{b_0}{1 + \left[\left(\frac{b_0}{HD_1} - 1 \right) \cdot \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{b_2} \right]}$
Chapman- Richards	$HD_1 = b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1})^{b_2}$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left(\frac{1 - e^{-b_1 \cdot E_2}}{1 - e^{-b_1 \cdot E_1}} \right)^{b_2}$	$HD_2 = b_0 \cdot [1 - e^{-b_1 \cdot E_2}]^{\left(\frac{\ln \left(\frac{HD_1}{b_0} \right)}{\ln(1 - e^{-b_1 \cdot E_1})} \right)}$
Weibull	$HD_1 = b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1^{b_2}})$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-b_1 \cdot E_2^{b_2}}}{1 - e^{-b_1 \cdot E_1^{b_2}}} \right]$	$HD_2 = b_0 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{HD_1}{b_0} \right)^{\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^{b_2}} \right]$
Bass	$HD_1 = \frac{b_0 \cdot (1 - e^{-b_1 \cdot E_1})}{1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_1}}$	$HD_2 = HD_1 \cdot \left[\frac{1 - e^{-b_1 \cdot E_2} / 1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_2}}{1 - e^{-b_1 \cdot E_1} / 1 + b_2 \cdot e^{-b_1 \cdot E_1}} \right]$	

HD_1 y HD_2 : altura dominante en su condición inicial (E_1) y proyectada (E_2), b_0 , b_1 y b_2 : parámetros de los modelos.

3.5. Proporción de área basal de hojosas

Aunque en el área el manejo forestal está orientado a la formación de masas coetáneas puras, durante los muestreos de campo se encontró una presencia notable de hojosas (Figura 3). Debido a la capacidad que tienen para almacenar carbono y la cantidad encontrada en el área, se decidió incluir este componente dentro del sistema. La variable usada para modelar este componente es la proporción del área basal de hojosas (q), la cual se calculó de la siguiente forma:

$$q = \frac{ABH}{ABH + ABP}$$

Donde ABH : área basal de hojosas y ABP : área basal de pino

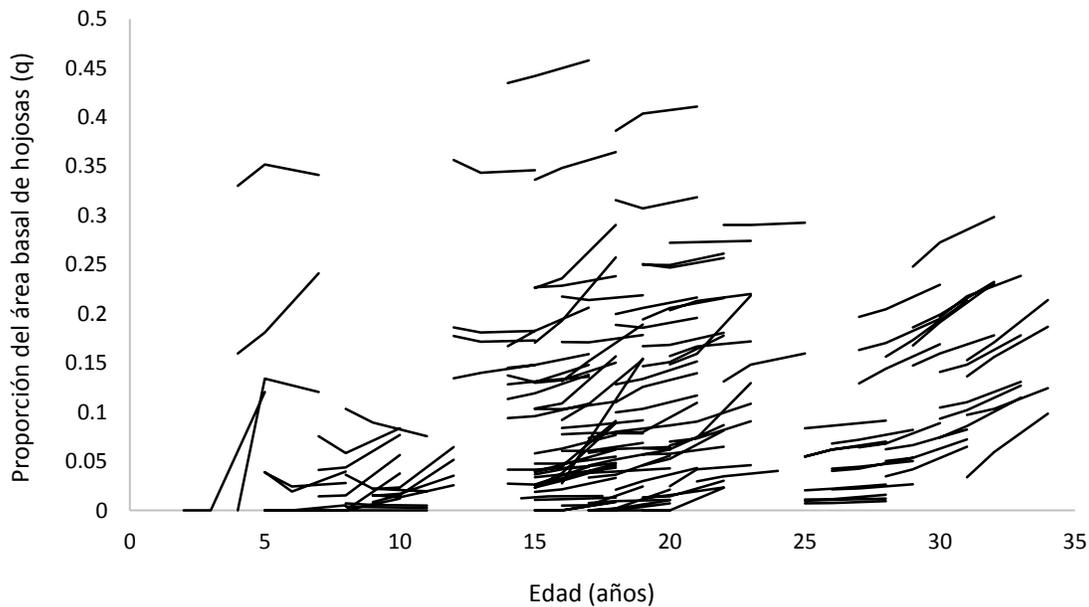


Figura 3. Cambios en la proporción del área basal de hojosas en el tiempo en bosques *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo

En este estudio, se asume que el comportamiento de la proporción del área basal de hojosas en el tiempo tiende a aumentar, por lo que dejar a cierta edad una proporción alta de hojosas - si bien

contribuye a los parámetros de biodiversidad del bosque, así como a la biomasa aérea total - afectará de manera negativa la producción de la especie comercial.

Para modelar este comportamiento se empleó la ecuación (1) usada por Martin y Brister (1999), la cual proyecta la proporción de área basal de E_1 a E_2 .

$$q_2 = q_1 \left(\frac{E_1}{E_2} \right)^\omega \quad (1)$$

donde q_1 y q_2 : proporción del área basal de hojosas a la edad E_1 y E_2 , ω : parámetro del modelo.

3.6. Área basal

Para modelar el área basal de pino se usaron las ecuaciones (2) y (3). La primera es el comportamiento promedio (modelo de predicción) y la segunda es el modelo de proyección, compuesto de dos partes, una ecuación de proyección de área basal, y un factor de reducción del área basal de pino de acuerdo con la proyección de la proporción del área basal de hojosas (q_2).

$$ABP_1 = \delta_0 \cdot HD_1^{\delta_1} \cdot e^{\left(-\frac{\delta_2}{E_1} + \frac{\delta_3}{E_1} \cdot NAP_1 \right)} \quad (2)$$

$$ABP_2 = \left[ABP_1 \cdot \left(\frac{HD_2}{HD_1} \right)^{\delta_1} \cdot e^{-\delta_2 \cdot \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right) + \delta_3 \cdot \left(\frac{NAP_2}{E_2} - \frac{NAP_1}{E_1} \right)} \right] \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{E_1}{E_2} \right)} \quad (3)$$

donde ABP_1 , HD_1 y NAP_1 : área basal de pino, altura dominante y número de árboles de pino a la edad E_1 , respectivamente, ABP_2 , HD_2 y NAP_2 : las mismas variables a la edad E_2 , q_2 : proporción del área basal de hojosas y δ_0 , δ_1 , δ_2 y δ_3 : parámetros de los modelos.

Finalmente, el área basal de hojosas proyectada se estimó usando la definición de q , en su condición 2, es decir:

$$q_2 = \frac{ABH_2}{ABH_2 + ABP_2}$$

De aquí, mediante desarrollo algebraico, se despeja la variable de interés ABH_2 resultando la ecuación (4). En esta ecuación puede notarse que, a medida que q_2 tiende a cero el valor de ABH_2 también tiende a cero.

$$ABH_2 = \frac{ABP_2 \cdot q_2}{1 - q_2} \quad (4)$$

El área basal total, puede calcularse al sumar el área basal de hojosas más el área basal de pino, proyectadas.

$$ABT_2 = ABP_2 + ABH_2$$

Equivalentemente, el área basal total se puede obtener utilizando nuevamente la definición de q_2 , de donde se obtiene la siguiente expresión:

$$ABT_2 = \frac{ABP_2}{1 - q_2}$$

ABH_2 , ABP_2 y q_2 : área basal de hojosas, área basal de pino y proporción de área basal de hojosas, respectivamente, a la edad de proyección.

3.7. Número de árboles vivos en el tiempo

Esta variable, a pesar de la importancia de conocerla, no es fácil de predecir. Debido a esto se recurre a modelos de proyección que parten de una condición inicial para estimar una condición futura. Estos modelos son continuos, es decir, que la mortalidad no es modelada en episodios como se esperaría que ocurra en un rodal. Se ajustó el modelo (5), el cual consta en la primera parte del modelo de proyección para estimar el número de árboles a una E_2 a partir de una condición anterior

(Torres y Magaña, 2001). Al igual que para el modelo de área basal, la segunda parte del modelo es el factor de reducción por la presencia de hojosas.

$$NAP_2 = [NAP_1 \cdot e^{(-\beta_1 \cdot (E_2 - E_1))}] \cdot (1 - q_2)^{\left(1 - \frac{E_1}{E_2}\right)} \quad (5)$$

donde NAP_1 y NAP_2 : número de árboles de pino a la edad E_1 y E_2 , q_2 : proporción del área basal de hojosas y β_1 : parámetro del modelo.

3.8. Volumen

Para modelar el volumen de pino por hectárea actual y futuro, se ajustaron las ecuaciones (6) y (7), aunque dichas ecuaciones no incluyen explícitamente la proporción de hojosas en los rodales, ésta ya fue incluida en la proyección del área basal de pino y del número de árboles.

$$VP_1 = e^{\theta_0} \cdot e^{\frac{-\theta_1}{HD_1}} \cdot E_1^{\theta_2} \cdot ABP_1^{\theta_3} \quad (6)$$

$$VP_2 = VP_1 \cdot e^{-\theta_1 \left(\frac{1}{HD_2} - \frac{1}{HD_1}\right)} \cdot \left(\frac{E_2}{E_1}\right)^{\theta_2} \cdot \left(\frac{ABP_2}{ABP_1}\right)^{\theta_3} \quad (7)$$

donde VP_1 , ABP_1 , HD_1 , E_1 : volumen de pino, área basal de pino, altura dominante y edad en la condición inicial, VP_2 , ABP_2 , HD_2 , E_2 : las mismas variables para la condición proyectada y θ_0 , θ_1 , θ_2 y θ_3 : parámetros de los modelos.

Para modelar el volumen de hojosas se utilizó la relación que existe entre éste y el área basal de hojosas (Figura 4), usando la ecuación (8).

$$VH_2 = \lambda \cdot ABH_2 \quad (8)$$

donde VH_2 y ABH_2 : volumen y área basal de hojosas proyectados y λ : parámetro del modelo.

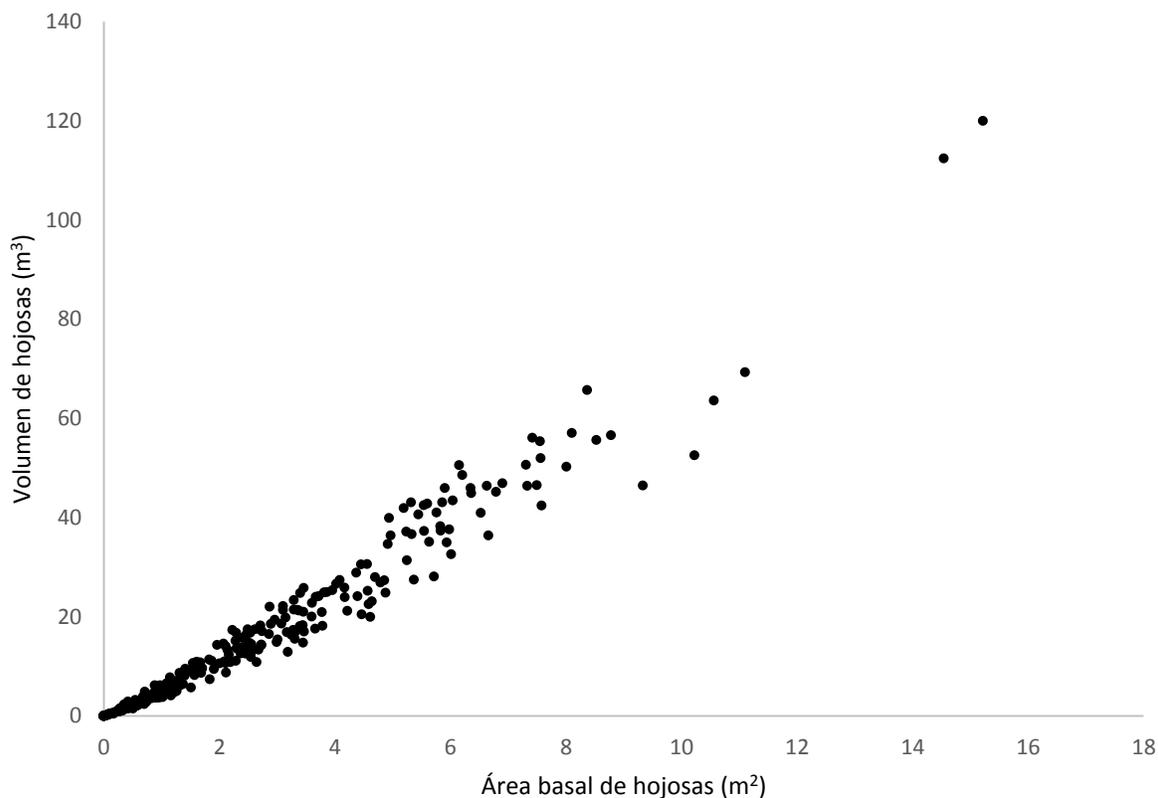


Figura 4. Relación entre el área basal y el volumen de hojosas.

3.9. Biomasa y carbono

Las ecuaciones compatibles (9) y (10) se ajustaron para estimar la biomasa aérea arbórea de pino por ha. Además, se estimó la biomasa del componente de hojosas con la ecuación (11). El carbono aéreo arbóreo almacenado en los rodales para cada componente se estimó usando 0.5 como factor de proporción de carbono (IPCC, 2003).

$$BP_1 = \gamma_0 \cdot VP_1^{\gamma_1} \quad (9)$$

$$BP_2 = BP_1 \cdot \left(\frac{VP_2}{VP_1}\right)^{\gamma_1} \quad (10)$$

$$BH_2 = \varphi \cdot VH_2 \quad (11)$$

donde BP_1 y VP_1 : biomasa y volumen de pino en la condición inicial, BP_2 , VP_2 , BH_2 , VH_2 : biomasa y volumen de pino, biomasa y volumen de hojosas en la condición proyectada y γ_0 , γ_1 , φ : parámetros de los modelos.

3.10. Ajuste del sistema

Los modelos de *HD*, *ABP*, *VP* y *BP* fueron ajustados de manera simultánea con el método de regresión aparentemente no relacionada (*SUR*, seemingly unrelated regression) mediante el procedimiento MODEL de SAS/ETS®. La técnica SUR proporciona mejores estimaciones cuando los componentes del error se correlacionan en el sistema de ecuaciones. La proporción de hojosas y el número de árboles de pino estimaron con mínimos cuadrados ordinarios no lineales, mientras que el volumen de hojosas y la biomasa de hojosas con mínimos cuadrados ordinarios lineales.

Como criterios de bondad de ajuste se usaron el coeficiente de determinación ajustado estimado para regresión no lineal (R^2 ajustada), la raíz de los cuadrados medios del error (REMC), el nivel de significancia de los parámetros ($Pr > |t|$) y el comportamiento lógico de los modelos mediante el análisis gráfico de los valores estimados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Modelo de altura dominante

El ajuste simultáneo de los modelos de altura dominante permitió obtener compatibilidad de los parámetros estimados, por lo que éstos son los mismos para las ecuaciones de predicción y proyección. Todos los modelos del Cuadro 1 **Cuadro 1. Modelos de predicción y proyección anamórficos y polimórficos de altura dominante ajustados.** presentaron estadísticos de ajuste similares, por lo que solo se muestran los criterios de ajuste de los que se consideraron mejores para describir el comportamiento de la altura dominante en el área de estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2. Parámetros y estadísticos de ajuste de los modelos de altura dominante para *Pinus patula*.

Modelo	Ecuación	Estadísticos de ajuste			Parámetros estimado	Error estándar	Pr> t
		CME	RCME	R ² ajustada			
Weibull anamórfico	Predicción	7.8690	2.8052	0.7790	$b_0 = 32.61377$	1.7899	<.0001
					$b_1 = 0.058543$	0.0054	<.0001
	Proyección	0.7306	0.8548	0.9766	$b_2 = 0.976018$	0.0539	<.0001
Chapman- Richards polimorfico	Predicción	7.5822	2.7536	0.7871	$b_0 = 30.34393$	0.8018	<.0001
					$b_1 = 0.0712$	0.00631	<.0001
	Proyección	0.4801	0.6929	0.9846	$b_2 = 1.225866$	0.0901	<.0001
Hosfeld IV polimorfico	Predicción	7.8568	2.803	0.7794	$b_0 = 39.60097$	2.5375	<.0001
					$b_1 = 3.345506$	0.1198	<.0001
	Proyección	0.6058	0.7784	0.9806	$b_2 = 1.178156$	0.0774	<.0001
Bass Anamórfico	Predicción	7.4761	2.7342	0.7901	$b_0 = 29.09753$	0.9464	<.0001
					$b_1 = 0.092249$	0.0134	<.0001
	Proyección	0.7636	0.8739	0.9756	$b_2 = 0.769265$	0.336	0.0228

Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error y RCME: raíz de los cuadrados medios del error.

Los modelos explicaron del 77.9 al 98.4% de la varianza total de la variable altura dominante y los parámetros fueron todos significativos. Los valores altos de R^2 son comunes para la variable altura dominante en *P. patula* (Santiago-García *et al.*, 2013) y otras especies (De los Santos-Posadas *et al.*, 2006; Fierros-Mateo *et al.*, 2017), en especial para modelos de proyección. En tanto que para los de predicción los ajustes son más bajos como se observa en este estudio y en los obtenidos por Parra-Piedra *et al.* (2017) quienes reportan valores de 79.5% en predicción y 86.6% en proyección.

Los estadísticos de ajuste similares sugieren que cualquiera de los modelos puede usarse para modelar el comportamiento de la variable altura dominante. No obstante, un criterio de elección del modelo de crecimiento dada la similitud en los indicadores de bondad de ajuste fue analizar la capacidad predictiva del mismo, al describir el comportamiento de los datos observados en campo, para ello, se derivaron cinco índices de sitio (15, 20, 25, 30 y 35) a una edad base de 40 años, donde el *IS* 15 denota rodales con productividad baja y el *IS* 35 rodales de alto potencial productivo. El patrón de crecimiento de los modelos se observa en la Figura 5. A pesar de tener buenos criterios de ajuste, el modelo polimórfico de Chapman-Richards no describe adecuadamente el comportamiento de los datos observados.

Los demás modelos probados pueden ser usados para estimar la altura dominante. Para la construcción del SCR se decidió utilizar el modelo anamórfico de Weibull ((12) y (13)), porque describe coherentemente la tendencia de los datos. Este modelo implica que la tasa de crecimiento es constante, mientras que la potencialidad máxima varía. Autores como Martínez-Zurimendi *et al.* (2015), Santiago-García *et al.* (2013), Gonzalez-Benecke *et al.* (2012) y Galán *et al.* (2008) utilizaron modelos anamórficos para describir el crecimiento en altura dominante de *Gmelina arborea*, *Pinus patula*, *Pinus palustris* y *Cedrela odorata* y *Tabebuia donnell-smithii* respectivamente.

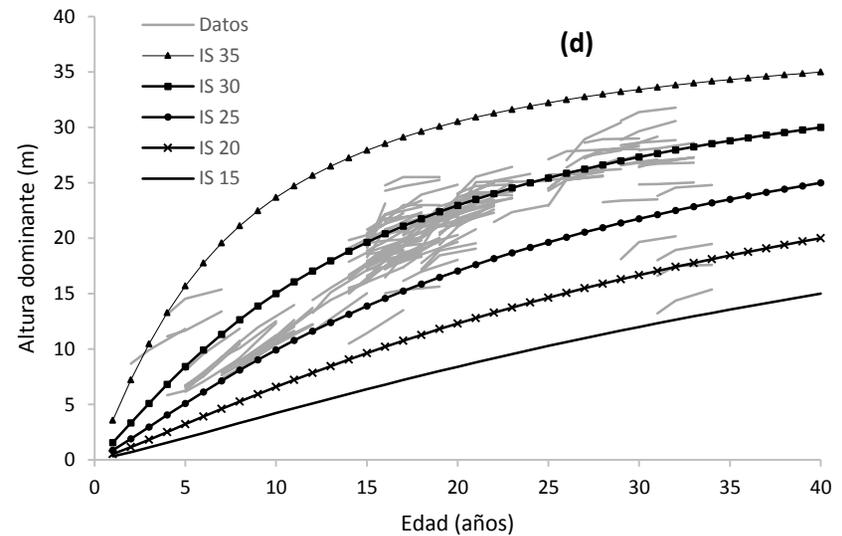
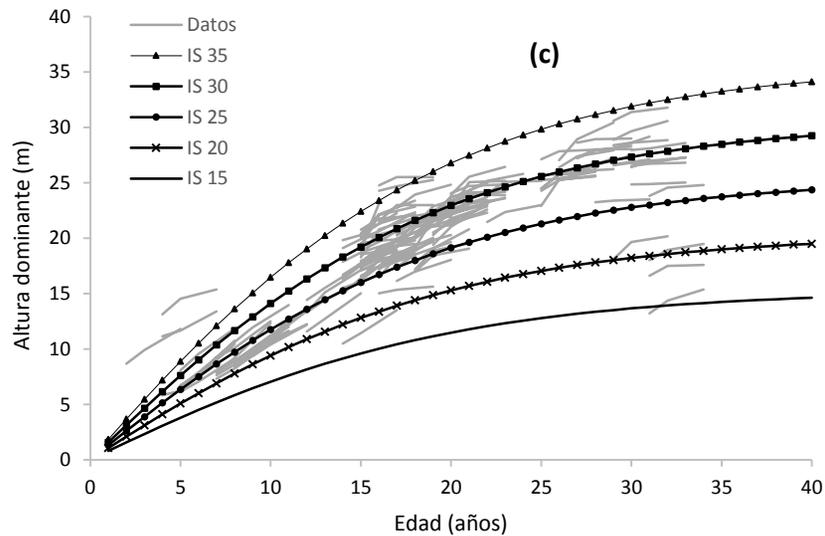
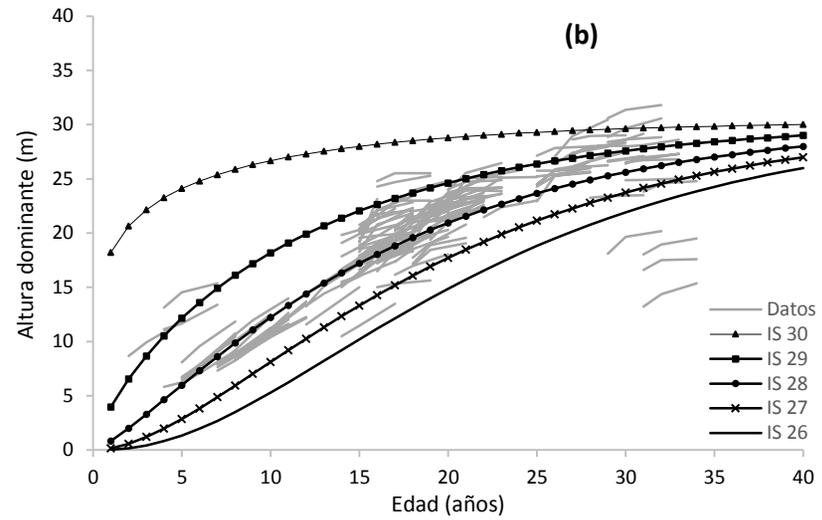
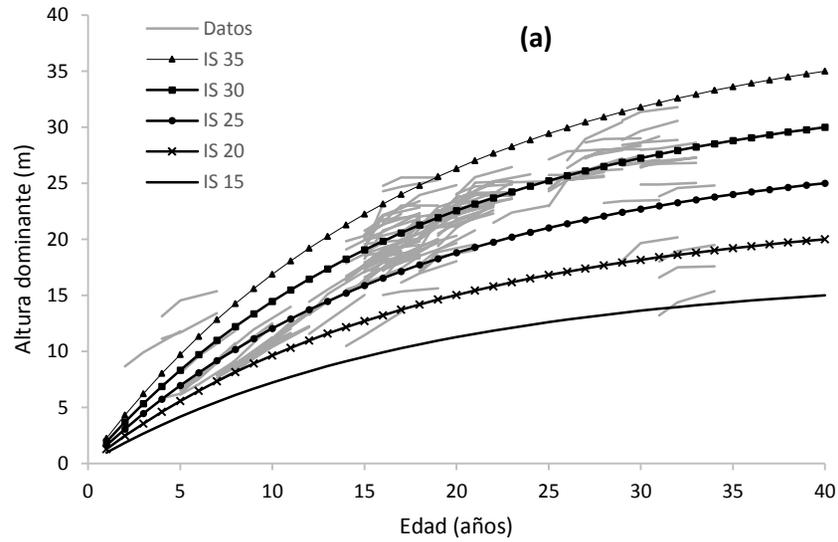


Figura 5. Familia de curvas de crecimiento en altura dominante para los modelos Weibull anamórfico (a), Chapman-Richards polimórfico (b), Bass anamórfico (c) y Hossfeld IV polimórfico (d).

A partir de la ecuación de proyección (13) fue posible derivar la ecuación de índice de sitio (14), que permitió evaluar la calidad productiva del rodal y asignarle un valor a partir de su edad y la altura dominante del sitio, para esto se usó una edad base de 40 años.

$$HD_1 = 32.6137 \cdot \left(1 - e^{-0.058543 \cdot E_1^{0.976018}}\right) \quad (12)$$

$$HD_2 = HD_1 \cdot \frac{1 - e^{-0.058543 \cdot E_2^{0.976018}}}{1 - e^{-0.058543 \cdot E_1^{0.976018}}} \quad (13)$$

$$IS = HD_1 \cdot \frac{1 - e^{-0.058543 \cdot 40^{0.976018}}}{1 - e^{-0.058543 \cdot E_1^{0.976018}}} \quad (14)$$

dónde IS : índice de sitio, HD_1 y HD_2 : altura dominante en su condición inicial y proyectada y E_1 y E_2 : edad inicial y de proyección, respectivamente.

4.2. Modelo de proporción de área basal de hojosas

El ajuste de la ecuación (1) que modela el comportamiento de la proporción del área basal de hojosas se muestra en el Cuadro 3. Se resalta el valor de R^2 ajustada = 0.9725, el cual fue alto en comparación a 0.836 obtenido por Martin y Brister (1999) que usaron el mismo modelo.

Cuadro 3. Estadísticos de ajuste y parámetro del modelo de proyección de la proporción de área basal (q_2).

Modelo	Parámetro estimado	Estimación	Error estándar	Pr> t	Ec.	Estadísticos de ajuste		
						CME	RCME	R^2 ajustada
q_2	ω	0.417304	0.0402	<.0001	(1)	0.0002	0.0155	0.9725

Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error y RCME: raíz de los cuadrados medios del error.

En el Cuadro 4 se observa la proyección q dadas las condiciones iniciales de E_1 y q_1 . La ecuación de proporción de área basal de hojosas cumple con el supuesto de mantenerse creciente en el tiempo. Tienen una asíntota de 1, lo cual implica un rodal compuesto únicamente por hojosas.

Cuadro 4. Valores proyectados de la proporción de área basal de hojosas (q_2) en rodales de *Pinus patula*, para un intervalo de q_1 , E_1 , y E_2 usando la ecuación (1).

Edad ₁ (años)	q_1	Edad ₂ (años)						
		10	15	20	25	30	35	40
5	0.01	0.03	0.05	0.08	0.10	0.11	0.13	0.14
	0.1	0.18	0.23	0.27	0.31	0.34	0.36	0.38
	0.2	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.49	0.51
	0.3	0.41	0.47	0.51	0.54	0.57	0.59	0.60
10	0.01		0.02	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08
	0.1		0.14	0.18	0.21	0.23	0.26	0.27
	0.2		0.26	0.30	0.33	0.36	0.39	0.41
	0.3		0.36	0.41	0.44	0.47	0.49	0.51
15	0.01			0.02	0.02	0.03	0.04	0.05
	0.1			0.13	0.16	0.18	0.20	0.22
	0.2			0.24	0.27	0.30	0.32	0.34
	0.3			0.34	0.38	0.41	0.43	0.45
20	0.01				0.02	0.02	0.03	0.03
	0.1				0.12	0.14	0.16	0.18
	0.2				0.23	0.26	0.28	0.30
	0.3				0.33	0.36	0.39	0.41
25	0.01					0.01	0.02	0.02
	0.1					0.12	0.14	0.15
	0.2					0.23	0.25	0.27
	0.3					0.33	0.35	0.37
30	0.01						0.01	0.02
	0.1						0.12	0.13
	0.2						0.22	0.24
	0.3						0.32	0.34

q_1 : proporción de área basal de hojosas inicial, E_1 : edad inicial y E_2 : edad de proyección.

4.3. Modelo número de árboles en el tiempo

En el Cuadro 5 se muestran los estadísticos de ajuste del modelo de proyección del número de árboles de pino. Dicho modelo logra proyectar la mortalidad de los árboles de pino en función de

la proporción de hojosas y la edad del sitio, en otras investigaciones se ha usado como variable predictora el IS para *Pinus chiapensis* y *Pinus rudis* (Fierros-Mateo *et al.*, 2017; Magaña *et al.*, 2008). Santiago-García *et al.* (2013) mencionan que la inclusión del número de árboles por hectárea como variable de predicción, le da la connotación de densidad variable al sistema, con esto es posible simular regímenes silviculturales para distintos IS.

Cuadro 5. Estadísticos de ajuste y parámetro del modelo de número de árboles de pino (NAP).

Modelo	Parámetro estimado	Estimación	Error estándar	Pr> t	Ec.	Estadísticos de ajuste		
						CME	RCME	R ² ajustada
NAP	β_1	0.067783	0.0104	<.0001	(5)	111181.0	333.4	0.8113

Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error y RCME: raíz de los cuadrados medios del error.

El modelo es continuo, lo que quiere decir que si realiza proyecciones a edades avanzadas el modelo dará un valor de cero árboles de pino, lo que no sucederá en un bosque natural si no es por un evento catastrófico. Es por ello que en este tipo de modelos se recomienda fijar un número de árboles mínimo a partir de una edad determinada. Para realizar las estimaciones se definió un valor inicial de 2,000 árboles por hectárea, valor usado por Santiago-García *et al.* (2015) en bosques de *Pinus patula* con características similares. Se resalta la característica de transitividad en los modelos, la cual implica que se han de obtener los mismos resultados independientemente del número de pasos que se usen.

4.4. Modelos de área basal

El Cuadro 6 muestra los estadísticos de ajuste obtenidos al ajustarse de forma simultánea las ecuaciones de área basal de pino promedio (2) y de proyección (3). La ecuación promedio permite

estimar el área basal de pino cuando se desconoce la proporción del área basal de hojosas. Mientras que la ecuación (3) muestra el efecto de la competencia entre el pino y las hojosas en los rodales.

Cuadro 6. Estadísticos de ajuste y parámetros estimados para modelos de área basal de pino (2) y (3) ajustados de manera simultánea.

Modelo	Parámetros estimados	Estimación	Error estándar	Pr> t	Ec.	Estadísticos de ajuste		
						CME	RCME	R ² ajustada
Área basal de pino	δ_0	1.001188	0.2451	<.0001	(2)	24.2187	4.9212	0.7009
	δ_1	1.082251	0.0706	<.0001				
	δ_2	7.001105	0.6997	<.0001	(3)	3.7670	1.9409	0.9459
	δ_3	0.003693	0.0002	<.0001				

Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error y RCME: raíz de los cuadrados medios del error.

Para diferentes valores iniciales de AB_1 , q_1 y E_1 se generaron curvas de área basal (Figura 6; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

El modelo sugiere que el incremento en q causará una disminución del área basal de pino, sobre todo para rodales con altos valores iniciales de hojosas. Es interesante notar como la ocupación de las hojosas es acelerada si se deja una proporción mayor al 10% del área basal total. Esto resalta la necesidad de controlar adecuadamente la composición del rodal durante el ciclo de corta, sobre todo si se desean altas cosechas en turnos cortos.

El factor de reducción del modelo de área basal de pino toma el valor de 1 cuando en el rodal solamente hay presencia de pino, por lo que no hay competencia con las hojosas. Martín y Bristen (1999) acotan la ecuación usada en su investigación para no utilizar valores de $q_2 = 0$, sin embargo, debido a que éste valor depende de la ecuación (1) y a que en el área de estudio se encontraron

sitios en esta condición, se sugiere usar un valor de q_1 muy cercano a cero (p. ej. 0.0001) cuando ello ocurra, debido a que el ajuste se realizó usando sitios con y sin presencia de hojosas.

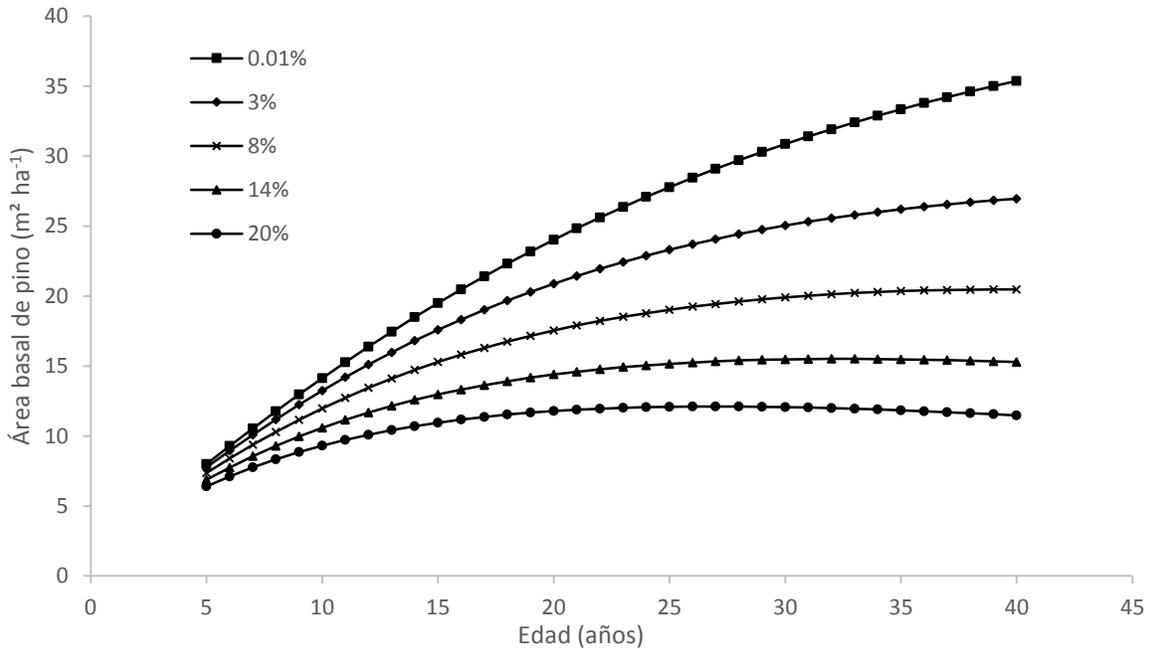


Figura 6. Proyección del área basal de pino en el índice de sitio promedio ($IS\ 30$) para cinco proporciones iniciales de área basal de hojosas, con $8\ m^2$ de área basal total a la edad de 5 años.

La forma en que se construyó el sistema permite que con la ecuación (4) se pueda estimar el área basal de hojosas proyectada (ABH_2), siempre que se conozca la proporción del área basal de hojosas (q_1), en el caso de que ésta se desconozca, entonces, ABH_2 no podrá ser estimada.

4.5. Modelos de volumen y biomasa

En el Cuadro 7 se presentan los estadísticos de ajuste de los modelos de volumen y biomasa, tanto para pino, como para hojosas. Los modelos de predicción y proyección fueron ajustados de forma simultánea lo que permitió compatibilidad en sus parámetros.

El parámetro λ expresa la relación directa que existente entre el área basal y el volumen de hojosas.

La estimación del parámetro indica que por cada metro cuadrado de área basal hay $6.47\ m^3$ de

volumen de hojosas. Lo mismo sucede con la ecuación de biomasa de hojosas, solo que en este caso la relación es de 0.83 Mg ha¹ de biomasa por cada metro cúbico de volumen de hojosas.

Cuadro 7. Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos de volumen pino (6) y (7) ajustados de manera simultánea y del modelos de volumen de hojosas.

Modelo	Parámetros estimados	Estimación	Error estándar	Pr> t	Ec.	Estadísticos de ajuste		
						CME	RCME	R ² ajustada
Volumen de pino	θ_0	2.622545	0.0862	<.0001	(6)	98.1061	9.9049	0.9919
	θ_1	16.91547	0.4959	<.0001				
	θ_2	0.116952	0.1558	<.0001	(7)	65.7913	8.1112	0.9945
	θ_3	1.015166	0.0111	<.0001				
Volumen de hojosas	λ	6.477901	0.0608	<.0001	(8)	14.3551	3.7888	0.9546
Biomasa de pino	γ_0	0.334109	0.00855	<.0001	(9)	40.8133	6.3885	0.9829
	γ_1	1.044842	0.00449	<.0001	(10)	1.2974	1.139	0.9995
Biomasa de hojosas	φ	0.816530	0.0029	<.0001	(11)	1.4464	1.2027	0.9933

Pr>|t|: prueba de t de Student para evaluar significancia de parámetros, CME: cuadrados medios del error y RCME: raíz de los cuadrados medios del error.

4.6. Uso del sistema de crecimiento

Una de las principales utilidades del SCR es la simulación de escenarios de manejo, esto se puede realizar mediante el cómputo directo de las ecuaciones generadas. Por la practicidad de uso se recurre a la construcción de tablas de rendimiento maderable por IS. En el Cuadro 8 se presenta una tabla de rendimiento promedio para *Pinus patula* de densidad variable para los índices de sitio 20, 25 y 30, con una densidad inicial de 2000 árboles por hectárea. Se reportan valores para altura dominante, área basal, volumen y carbono. Esta tabla fue generada a partir de los modelos

promedio, por lo cual el porcentaje de hojosas es de 0% asumiendo una masa pura de *Pinus patula* durante el periodo de proyección.

De acuerdo con el Cuadro 8, en el índice de sitio promedio (IS 30) el comportamiento del modelo promedio es congruente con las observaciones en campo. Este estima a los 35 años de edad 388.7 m³ ha⁻¹, rendimiento ligeramente más conservador al proyectado por Santiago-García *et al.* (2015) de 433.8 m³ ha⁻¹ para un IS 29 a la misma edad base. Este rendimiento es muy parecido a los 430 m³ ha⁻¹ estimados por Parra-Piedra *et al.* (2017) a la edad de 30 años en un IS equivalente, pero en plantaciones de *P. patula* en Zacualpan, Veracruz partiendo de una densidad inicial de 1,100 árboles por ha.

El turno técnico en volumen en el IS promedio (30 m a los 40 años de edad base) se alcanza a los 29 años para el área de estudio, de manera particular, se estimó a los 25, 27, 29, 31 y 35 años para los IS 35, 30, 25, 20 y 15, respectivamente (Figura 7). El turno medio resulta más largo que lo estimado por Santiago-García *et al.* (2015), que reporta valores de 20 y 22 años para los IS 29 y 27, en rodales coetáneos de *Pinus patula*, mientras que Parra-Piedra *et al.* (2017) estima turnos que van desde 14 a 21 años en plantaciones forestales comerciales de la misma especie. Aun así, la edad del turno técnico que se estima en este estudio es menor que el turno usado en la zona de 50 años.

Las ecuaciones de biomasa estimada, se comportan bastante semejantes a lo reportado por Figueroa-Navarro *et al.* (2010) para bosques de condiciones similares, donde, los valores se encuentran entre 45.9 y 166 Mg ha⁻¹ para edades de 9 a 25 años con datos de inventario forestal, mientras que, en este estudio los valores van desde 25.8 a 122.4 Mg ha⁻¹ para el mismo intervalo de edades en el IS promedio. En el sitio de mayor productividad las estimaciones pueden llegar a 161.4 Mg ha⁻¹ en el mismo intervalo.

Cuadro 8. Tabla de crecimiento y rendimiento promedio de *Pinus patula* para los índices de sitio 20, 25 y 30 m con una densidad inicial de 2000 árboles por ha y 0% de hojosas.

Edad	NAP	Altura dominante			Área basal			Volumen			Carbono		
		20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30
1	2000	1.3	1.6	1.9	1.9	2.5	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	1746	3.6	4.5	5.3	3.3	4.2	5.1	0.5	1.5	3.5	0.1	0.3	0.6
5	1525	5.6	7.0	8.3	4.9	6.2	7.6	4.0	9.3	17.1	0.7	1.7	3.2
6	1425	6.5	8.1	9.7	5.7	7.2	8.8	7.2	15.6	27.0	1.3	2.9	5.2
7	1332	7.3	9.2	11.0	6.4	8.2	10.0	11.4	23.1	38.3	2.1	4.4	7.5
9	1163	8.9	11.1	13.4	7.9	10.1	12.3	21.8	40.7	64.0	4.2	8.0	12.9
10	1087	9.6	12.0	14.5	8.6	11.0	13.4	27.8	50.4	77.8	5.4	10.0	15.8
11	1015	10.3	12.9	15.5	9.3	11.9	14.4	34.1	60.5	92.0	6.7	12.1	18.8
13	8867	11.6	14.5	17.4	10.6	13.6	16.5	47.6	81.5	120.9	9.5	16.6	25.1
14	829	12.2	15.2	18.2	11.3	14.4	17.5	54.6	92.1	135.5	10.9	18.9	28.2
15	774	12.7	15.9	19.1	11.9	15.1	18.5	61.7	102.9	150.1	12.4	21.2	31.4
16	724	13.2	16.5	19.8	12.5	15.9	19.4	68.8	113.5	164.5	13.9	23.5	34.6
17	676	13.7	17.1	20.6	13.1	16.6	20.3	75.9	124.2	178.8	15.4	25.7	37.7
18	632	14.2	17.7	21.3	13.6	17.3	21.1	83.0	134.7	192.9	16.9	28.0	40.8
19	590	14.6	18.3	21.9	14.2	18.0	22.0	90.1	145.1	206.8	18.4	30.3	43.9
20	552	15.0	18.8	22.6	14.7	18.7	22.8	97.0	155.3	220.4	19.9	32.5	46.9
21	516	15.4	19.3	23.1	15.2	19.3	23.5	103.9	165.3	233.8	21.4	34.7	49.9
22	482	15.8	19.8	23.7	15.7	19.9	24.3	110.7	175.2	246.9	22.8	36.9	52.8
23	450	16.2	20.2	24.2	16.1	20.5	25.0	117.3	184.8	259.7	24.3	39.0	55.7
24	421	16.5	20.6	24.7	16.6	21.1	25.7	123.8	194.3	272.1	25.7	41.1	58.5
25	393	16.8	21.0	25.2	17.0	21.6	26.4	130.2	203.5	284.3	27.1	43.1	61.2
26	367	17.1	21.4	25.7	17.4	22.2	27.0	136.4	212.5	296.2	28.4	45.1	63.9
27	343	17.4	21.7	26.1	17.8	22.7	27.6	142.5	221.2	307.7	29.7	47.1	66.5
28	321	17.7	22.1	26.5	18.2	23.2	28.2	148.5	229.7	318.9	31.0	49.0	69.0
29	300	17.9	22.4	26.9	18.6	23.6	28.8	154.2	238.0	329.8	32.3	50.8	71.5
30	280	18.2	22.7	27.3	18.9	24.1	29.3	159.8	246.1	340.4	33.5	52.6	73.9
31	262	18.4	23.0	27.6	19.3	24.5	29.9	165.3	253.9	350.6	34.7	54.4	76.2
32	245	18.6	23.3	27.9	19.6	24.9	30.4	170.6	261.5	360.6	35.9	56.1	78.4
33	229	18.8	23.5	28.2	19.9	25.3	30.9	175.8	268.8	370.3	37.0	57.7	80.6
34	214	19.0	23.8	28.5	20.2	25.7	31.3	180.8	276.0	379.6	38.1	59.3	82.8
35	200	19.2	24.0	28.8	20.5	26.1	31.8	185.6	282.9	388.7	39.2	60.9	84.8
36	187	19.4	24.2	29.1	20.8	26.5	32.2	190.3	289.6	397.5	40.2	62.4	86.8
37	174	19.5	24.4	29.3	21.0	26.8	32.6	194.9	296.1	406.0	41.2	63.8	88.8
38	163	19.7	24.6	29.6	21.3	27.1	33.0	199.3	302.4	414.3	42.2	65.3	90.7
39	152	19.9	24.8	29.8	21.6	27.4	33.4	203.6	308.5	422.3	43.2	66.6	92.5
40	142	20.0	25.0	30.0	21.8	27.7	33.8	207.8	314.4	430.0	44.1	68.0	94.3

NAP: número de árboles de pino.

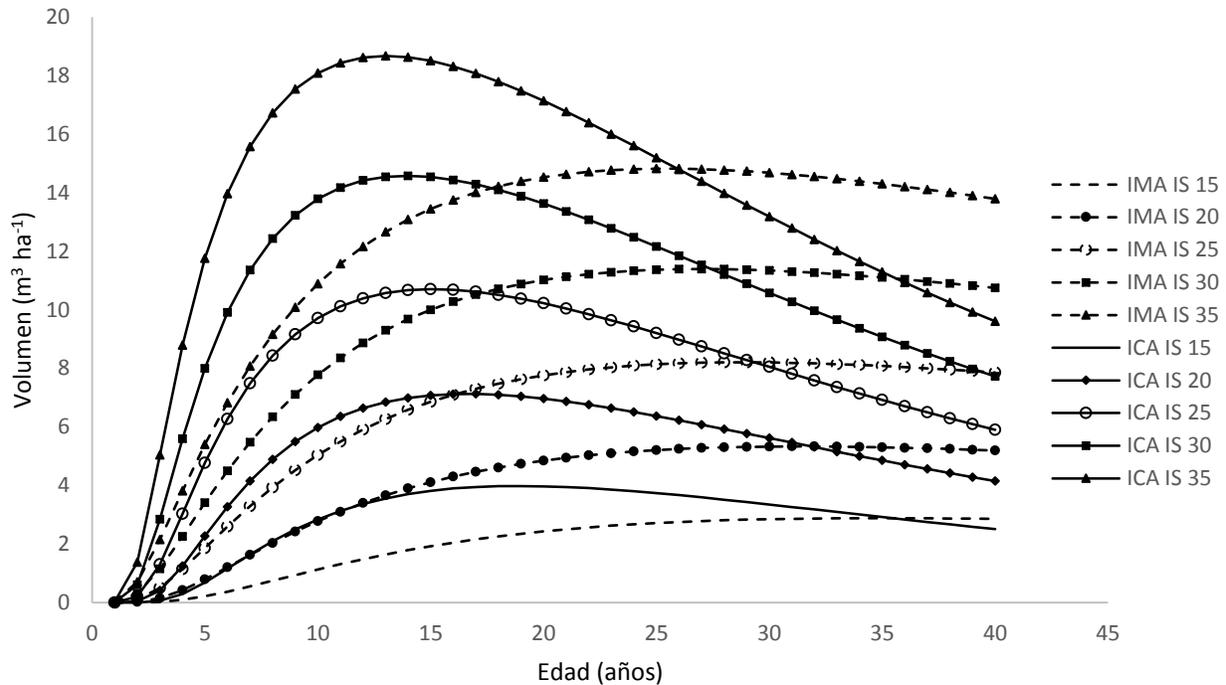


Figura 7. Incremento medio anua (ICA) e incremento corriente anual (IMA) para los IS (15, 20, 25, 30 y 35) en rodales de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo.

Las estimaciones de carbono realizadas a través de las ecuaciones de biomasa, proyectan valores entre 10.1 y 58.5 Mg ha⁻¹ para el IS 30 y entre 14.8 y 77.3 Mg ha⁻¹ en el IS de mayor productividad para edades de 8 hasta 24 años. Estos valores son un poco menores, aunque en el intervalo, de las estimaciones realizadas por Aguirre-Salado *et al.* (2009), quienes reportan de 20 a 100 Mg ha⁻¹, dicho estudio fue realizado con imágenes de satélite para bosques de la región en el mismo intervalo de edades.

En otros estudios se han realizado estimaciones a partir de datos de inventario, con resultados que van de los 50 Mg ha⁻¹ para bosques de encino (Báez-Pérez *et al.*, 2012) y 125, 112.5 y 96.7 Mg ha⁻¹ para bosque de pino, encino-pino y pino-encino, respectivamente (Domínguez-Cabrera *et al.*, 2012). Sin embargo, una ventaja de esta investigación y de los sistemas de crecimiento y

rendimiento es que se puede realizar proyecciones confiables del comportamiento de las variables en el tiempo a partir de datos que representan las condiciones iniciales de la masa.

Con el sistema generado, se pueden simular múltiples escenarios y construir diversas tablas de rendimiento, de acuerdo con las condiciones que se deseen modelar, además se puede incluir la presencia de hojosas con diferentes porcentajes iniciales. En el Cuadro 9 se muestra una tabla de rendimiento en la cual se incluye la variable q , donde, a la edad de 5 años representa el 4% del área basal total. Se muestran las estimaciones para altura dominante, área basal, volumen y carbono para *Pinus patula* y para las hojosas.

Al comparar los resultados del sistema con y sin presencia de hojosas puede observarse como el volumen de pino en el *IS* 30 tiende a disminuir en la medida que la proporción de hojosas aumenta (Figura 8 (a)), esta relación se pudo encontrar en todos los índices de sitio. Entonces, para obtener mayor rendimiento de pino será necesario disminuir la presencia de las especies de hojosas. Sin embargo esta tendencia no se mantiene para el volumen total (volumen de pino más el de hojosas) donde el índice de sitio sí afecta su comportamiento (Figura 8 (b, c y d)). En el *IS* 15 el volumen total de un rodal con presencia de hojosas es mayor que si se considera un rodal puro de pino en los primeros años y tienden a igualarse a edades mayores.

La tendencia observada en el volumen total es que, en los sitios más productivos, los rodales puros de pino tendrán más volumen que aquellos con algún porcentaje de hojosas. En estos casos, la diferencia en volumen será mayor a medida que el *IS* también es mayor.

Cuadro 9. Tabla de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* y hojosas para los índices de sitio 25 y 30 m con proporción de área basal de hojosas de 4% a los 5 años.

Edad	NAP	HD		ABP		ABH		VP		VH		CP		CH	
		25	30	25	30	25	30	25	30	25	30	25	30	25	30
5	1525	7.0	8.3	6.2	7.6	0.3	0.3	9.3	17.1	1.7	2.0	1.7	3.2	0.7	0.8
6	1413	8.1	9.7	7.1	8.6	0.4	0.5	15.3	26.5	2.4	3.0	2.9	5.1	1.0	1.2
7	1308	9.2	11.0	7.9	9.7	0.5	0.6	22.4	37.2	3.3	4.1	4.3	7.3	1.4	1.7
8	1211	10.2	12.2	8.7	10.7	0.7	0.8	30.1	48.6	4.3	5.3	5.9	9.7	1.8	2.2
9	1120	11.1	13.4	9.5	11.6	0.8	1.0	38.5	60.5	5.4	6.6	7.6	12.2	2.2	2.7
10	1037	12.0	14.5	10.3	12.5	1.0	1.2	47.1	72.8	6.6	8.0	9.4	14.7	2.7	3.3
11	960	12.9	15.5	11.0	13.4	1.2	1.5	56.0	85.2	7.8	9.5	11.2	17.4	3.2	3.9
12	888	13.7	16.5	11.7	14.2	1.4	1.7	65.1	97.6	9.1	11.1	13.1	20.0	3.7	4.5
13	822	14.5	17.4	12.3	15.0	1.6	2.0	74.1	110.0	10.4	12.7	15.0	22.7	4.3	5.2
14	761	15.2	18.2	13.0	15.8	1.8	2.2	83.1	122.2	11.8	14.4	16.9	25.3	4.8	5.9
15	705	15.9	19.1	13.6	16.5	2.0	2.5	92.0	134.2	13.2	16.1	18.8	27.9	5.4	6.6
16	653	16.5	19.8	14.1	17.2	2.3	2.8	100.7	145.9	14.6	17.8	20.7	30.5	6.0	7.3
17	605	17.1	20.6	14.7	17.9	2.5	3.0	109.3	157.4	16.1	19.6	22.5	33.0	6.6	8.0
18	561	17.7	21.3	15.2	18.5	2.7	3.3	117.6	168.5	17.6	21.4	24.3	35.4	7.2	8.7
19	520	18.3	21.9	15.7	19.1	2.9	3.6	125.8	179.3	19.1	23.2	26.1	37.8	7.8	9.5
20	482	18.8	22.6	16.1	19.6	3.2	3.9	133.7	189.8	20.6	25.0	27.8	40.1	8.4	10.2
21	447	19.3	23.1	16.6	20.2	3.4	4.1	141.3	199.8	22.1	26.9	29.5	42.3	9.0	11.0
22	415	19.8	23.7	17.0	20.7	3.6	4.4	148.7	209.6	23.6	28.7	31.1	44.5	9.6	11.7
23	385	20.2	24.2	17.4	21.1	3.9	4.7	155.9	219.0	25.0	30.5	32.7	46.6	10.2	12.5
24	357	20.6	24.7	17.7	21.6	4.1	5.0	162.7	228.0	26.5	32.3	34.2	48.6	10.8	13.2
25	331	21.0	25.2	18.1	22.0	4.3	5.3	169.4	236.6	28.0	34.1	35.6	50.5	11.4	13.9
26	307	21.4	25.7	18.4	22.4	4.6	5.5	175.7	244.9	29.5	35.9	37.0	52.4	12.0	14.7
27	285	21.7	26.1	18.7	22.8	4.8	5.8	181.8	252.9	30.9	37.7	38.4	54.1	12.6	15.4
28	265	22.1	26.5	19.0	23.1	5.0	6.1	187.6	260.5	32.4	39.4	39.6	55.8	13.2	16.1
29	246	22.4	26.9	19.3	23.5	5.2	6.4	193.2	267.8	33.8	41.2	40.9	57.5	13.8	16.8
30	228	22.7	27.3	19.5	23.8	5.4	6.6	198.6	274.7	35.2	42.9	42.1	59.0	14.4	17.5
31	212	23.0	27.6	19.7	24.1	5.6	6.9	203.7	281.3	36.6	44.6	43.2	60.5	14.9	18.2
32	197	23.3	27.9	20.0	24.3	5.9	7.1	208.6	287.7	37.9	46.2	44.3	61.9	15.5	18.9
33	183	23.5	28.2	20.2	24.6	6.1	7.4	213.3	293.7	39.3	47.9	45.3	63.3	16.0	19.5
34	170	23.8	28.5	20.4	24.8	6.3	7.6	217.7	299.5	40.6	49.5	46.3	64.6	16.6	20.2
35	158	24.0	28.8	20.5	25.0	6.5	7.9	221.9	304.9	41.9	51.1	47.2	65.8	17.1	20.9
36	147	24.2	29.1	20.7	25.2	6.7	8.1	226.0	310.1	43.2	52.6	48.1	67.0	17.6	21.5
37	136	24.4	29.3	20.9	25.4	6.9	8.4	229.8	315.1	44.5	54.2	49.0	68.1	18.2	22.1
38	127	24.6	29.6	21.0	25.6	7.1	8.6	233.4	319.8	45.7	55.7	49.8	69.2	18.7	22.7
39	118	24.8	29.8	21.2	25.8	7.2	8.8	236.9	324.3	46.9	57.2	50.6	70.2	19.2	23.3
40	109	25.0	30.0	21.3	25.9	7.4	9.1	240.2	328.5	48.1	58.6	51.3	71.2	19.7	23.9

HD: altura dominante, ABP, VP y CP: área basal, volumen y carbono de pino, ABH, VH y CH: área basal, volumen y carbono de hojosas.

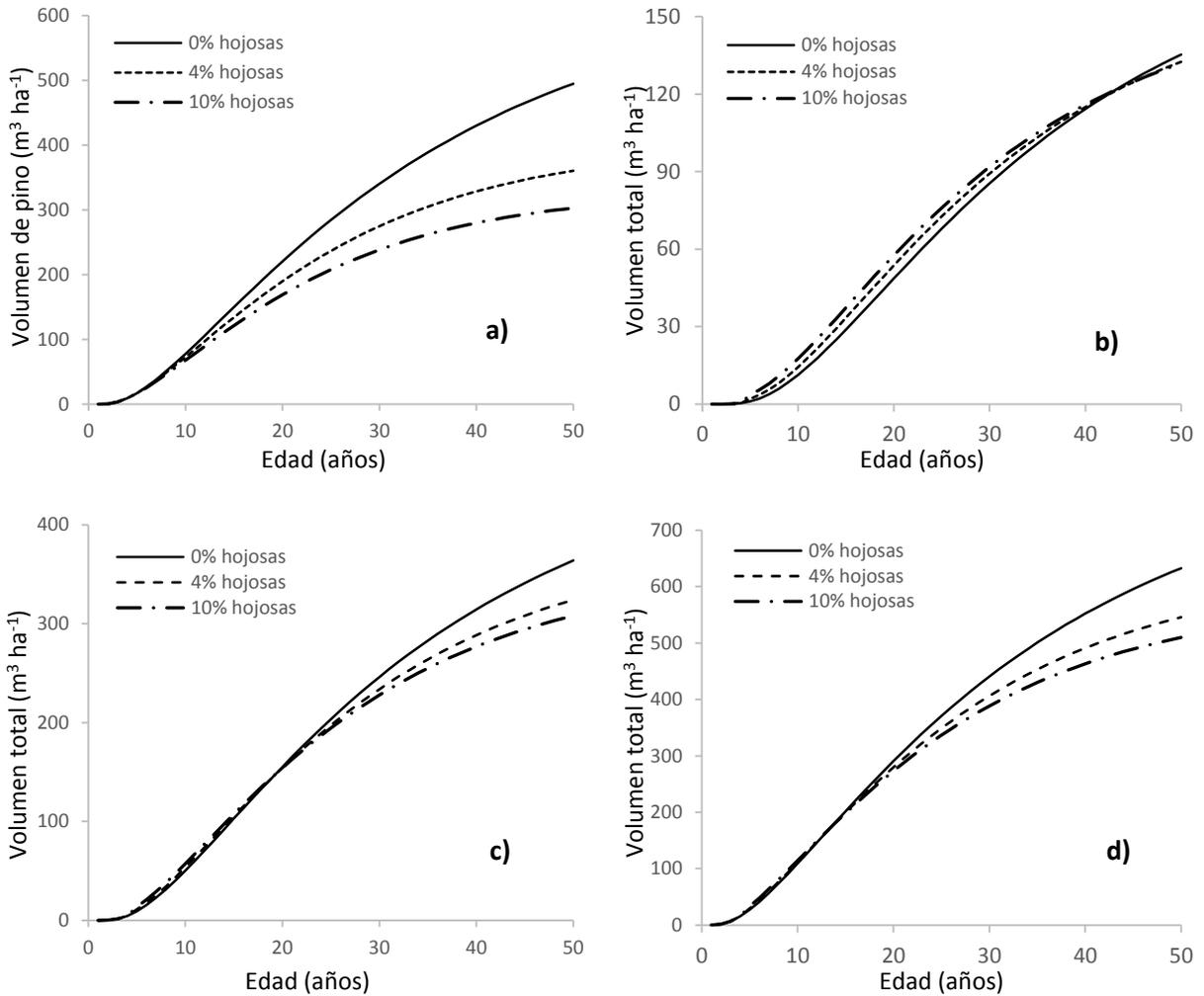


Figura 8. a) Volumen de pino en el IS 30, b), c) y d) volumen total en los IS 15, 25 y 35, respectivamente, para tres porcentajes de hojosas a los cinco años de edad.

Es de resaltar lo que ocurre con la biomasa y carbono, donde la tendencia encontrada en el volumen total se revierte. En este caso, al simular el comportamiento de la biomasa en condiciones de un rodal puro de pino y otro con 4% de hojosas a los 5 años de edad, se encontró que los IS 15, 20 y 25 acumulan más biomasa con el componente de hojosas que si éste se omite y se considera el manejo de los rodales como masas puras de *Pinus patula*.

En los sitios más productivos (IS 30 y 35) esto se vuelve indistinto en términos de acumulación de biomasa, debido a los altos volúmenes de pino a través de los cuales se logra compensar la aportación de las hojosas.

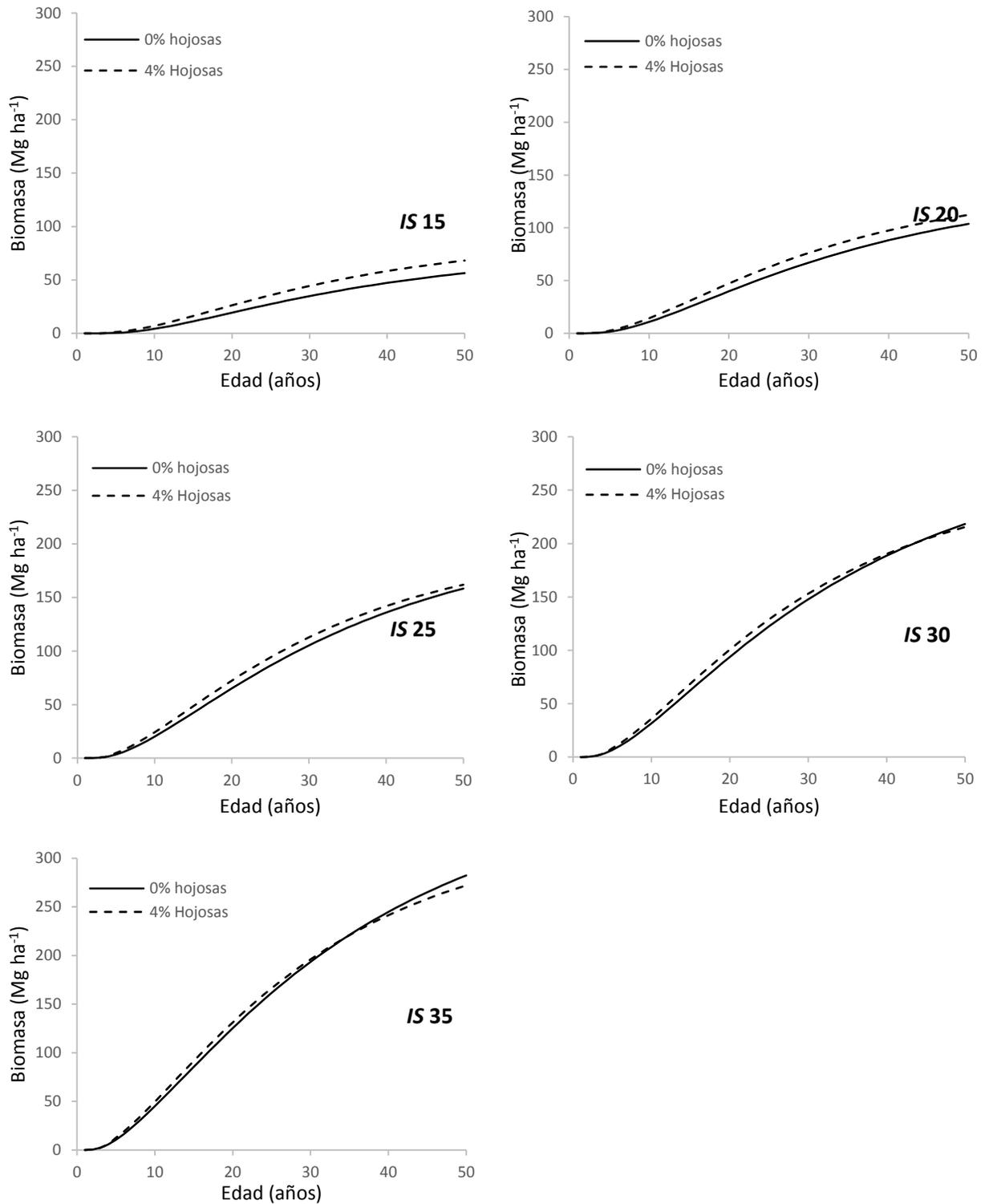


Figura 9. Biomasa total en los IS 15, 20, 25, 30 y 35 para dos porcentajes iniciales de hojas a la edad de 5 años.

Es claro que el manejo de los rodales como masas puras propiciará mayor rendimiento en volumen de la especie de interés comercial, sin embargo, al considerar que los bosques funcionan como sumideros de carbono debe tomarse en cuenta la capacidad de las especies de hojosas de almacenarlo. El sistema de crecimiento generado estima, en promedio, que *Pinus patula* almacena 0.21 Mg ha^{-1} de carbono por cada m^3 de volumen, mientras que las hojosas 0.41 Mg ha^{-1} por m^3 . Lo anterior, debe considerarse al pensar en la mezcla o no de especies en los rodales, en función de los objetivos principales y secundarios de los bosques.

5. CONCLUSIONES

Con el modelo de Weibull anamórfico se generaron curvas de índice de sitio con valores de 15, 20, 25, 30 y 35 m, considerando una edad base de 40 años. Es de destacar, el amplio intervalo de índice de sitio encontrado que refleja la diversidad de condiciones de productividad en el área de estudio. Difiere de estudios recientes realizados en la región donde el área muestreada era pequeña y con un manejo mucho más homogéneo.

A través de modelar la proporción de hojosas y el efecto en la densidad, el sistema aquí generado permite simular diferentes escenarios silvícolas para las diferentes calidades de sitio encontradas en los bosques coetáneos de *Pinus patula* en la región de Zacualtipán, Hidalgo.

La incorporación de la variable proporción de área basal de hojosas permite modelar la competencia interespecífica de pino y hojosas y conocer el efecto sobre el primero. El sistema sugiere que su presencia causará una disminución del área basal de pino, en especial, si los rodales cuentan con altos valores iniciales de éstas. El sistema permite identificar que una proporción mayor al 10% de hojosas, acelera considerablemente la presencia de éstas en el rodal, por lo que es de suma importancia controlar la composición del rodal si se desea favorecer el desarrollo del pino sobre el de hojosas y lograr cosechas altas en turnos cortos.

El hecho de que el turno técnico promedio se haya estimado en 29 años corrobora, como en estudios previos, que el turno usado en los programas de manejo de la región (40 – 50 años) es demasiado largo, y además, podría reducirse mediante la aplicación de labores silvícolas más intensivas, como aclareos fuertes y control de vegetación asociada, así como la implementación de repoblación artificial con semilla de calidad genética superior.

La inclusión del componente de biomasa y carbono almacenado en el sistema de crecimiento permite realizar estimaciones asociadas a las diferentes etapas de desarrollo de los rodales. La presencia de hojosas en los rodales aumentará la captura de carbono en los sitios de menor productividad, pero significa menor volumen de la especie comercial.

El sistema de crecimiento puede complementarse con modelos de predicción implícita del rodal (distribuciones diamétricas) lo que permitirá estimar distribuciones de productos a nivel de unidad de superficie. Aunado a la toma de datos en respuesta a los aclareos, se podrán definir los regímenes silvícolas que generen estructuras diamétricas residuales de características deseables, de acuerdo con un objetivo específico, así como los tipos, intensidad y frecuencia de aclareos, por tanto, valorar la producción maderable de *P. patula*.

Las ecuaciones generadas pueden usarse para modelar el crecimiento de los rodales de *Pinus patula* en la región, siempre y cuando, características geográficas y condiciones de suelo y ambientales sean lo más semejantes posibles. También debe cuidarse que la predicción sea en el intervalo de edades del presente estudio.

Los resultados de esta investigación representan herramientas tecnológicas que los administradores forestales del área de estudio pueden usar para simular e identificar los mejores esquemas de manejo, y de esta forma, tomar decisiones sustentadas sobre una base sólida para planificar el proceso de producción forestal. Lo anterior, considerando las prácticas silvícolas que actualmente se aplican, a medida que éstas cambien, los resultados aquí plasmados, servirán más como una referencia de la silvicultura usada.

6. LITERATURA CITADA

- Aguirre-Salado, C. A., J. R. Valdez-Lazalde., G. Ángeles-Pérez., H. M. de los Santos-Posadas, R. Haapanen, y A. I. Aguirre-Salado. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosque de Pino patula en Hidalgo, México. *Agrociencia* 43:209-220.
- Ángeles P., G., B. Méndez L., R. Valdez L., F. O. Plascencia E., H. M. de los Santos P., G. Chávez A., A. D. Ortiz R., M. A. Soriano L., Z. Zaragoza C., E. Ventura P., A. Martínez L., C. Wayson, D. López M., M. Olguín A, O. Carrillo N., y V. Maldonado M. 2015. Estudio de caso del sitio de monitoreo intensivo del carbono en Hidalgo. Fortalecimiento REDD+ y cooperación sur. CONAFOR, COLPOS. 105 p.
- Assman, E. 1970. The principles of forest and yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Ed. Pergamon Press. Oxford, UK. 506 p.
- Avery, T. E. and H. E. Burkhart. 1983. Forest measurements. McGraw-Hill, Nueva York. USA. 331 p.
- Báez-Pérez, A., M. A. Hernández-Martínez, M. Acosta-Mireles Miguel y M. A. Bautista-Cruz. 2012. Inventario de carbono en la microcuenca La Laborcita en Sierra de Lobos, Guanajuato. In: Paz, F. y R. Cuevas (eds). Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2011. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con la Universidad Autónoma del Estado de México y el Instituto Nacional de Ecología. Texcoco, Estado de México, México. pp. 215-221.
- Bailey, R. L. and J. L. Clutter. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science* 20: 155-159.
- Brosovich G., M. M. 1998. Determinación del rendimiento para *Pinus patula* Schl. et Cham., en la región de Zacualtupán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 95 p.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Forest Resources Assessment Publication. Forestry Papers 134. FAO, Rome, 55 pp.
- Cieszewski, C. J. and R. L. Bailey. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science* 46: 116-126.
- Clark, B. D. y D. A. Clark. 2000. Landscape-scale variation in forest structure and biomass in a tropical rain forest. *Forest Ecology and Management* 137:185-198.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L. V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. 1983. Timber Management: A Quantitative Approach. John Wiley & Sons, Inc. New York. 333 p.

- Cruz C., F. 2007. Modelos de volumen y crecimiento en altura dominante para *Pinus cooperi* Blanco en el estado de Durango, México. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 69 p.
- Curtis, R. O. 1970. Stand density measures: an interpretation. *Forest Science*. 16: 403-414.
- Cutini, A., F. Chianucci and M. C. Manetti. 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *IForest* 6: 331-337.
- Davis, L. S. and K. N. Johnson. 1987. *Forest management*. Third Edition. McGraw-Hill, New York. USA. 804 p.
- De la Fuente E., A. 1998. Crecimiento y predicciones del rendimiento de rodales coetáneos de *Pinus rudis* Endl., de Pueblos Mancomunados, Ixtlán, Oaxaca. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 179 p.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala y J.D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et. Cham. *Madera y Bosques* 13: 25-34.
- Diéguez-Aranda, U., A. Rojo A., F. Castedo-Dorado, J. G. Álvarez G., M. Barrio-Anta, F. Crecente-Campo, J. M. González G., C. Pérez-Cruzado, R. Rodríguez S., C. A. López-Sánchez, M. Á. Balboa-Miruas, J. J. Gorgoso V. y F. Sánchez R. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. Dirección Xeral de Montes, Consellería do Medio Rural, Xunta de Galicia. Lugo, España. 259 p.
- Diéguez, A. U., M. Barrio A., F. Castedo D., A. D. Ruíz G., M. F. Álvarez T., J. G. Álvarez G. y A. Rojo A. 2003. *Dendrometría*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 327 p.
- Domínguez-Cabrera, G., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, R. Rodríguez-Laguna, y J. A. Díaz-Balderas. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15: 59-64.
- Domínguez C., C. 2011. *Manual interdisciplinario de investigación forestal*. Instituto Internacional de Dasonomía Tropical. USDA Forest Service. Río Piedras, Puerto Rico. 168 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2015. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015*. Compendio de datos. Roma. 245 p.
- Fierros-Mateo, R., H. M. De los Santos-Posadas, M. A. Fierros-González y F. Cruz-Cobos. 2017. Crecimiento y rendimiento maderable en plantaciones de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Agrociencia* 51: 201-214.
- Figuroa-Navarro, C. M., G. Ángeles-Pérez, A. Velázquez-Martínez, y H. M. De los Santos-Posadas. 2010. Estimación de Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 1: 105-112.

- Galán L., R., H. M. De los Santos P. y J. I. Valdez H. 2008. Crecimiento y rendimiento maderable de *Cedrela odorata* I. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 65-82.
- García, O. 1995. Apuntes de Mensura Forestal I. Estática. Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Chile. 65 p.
- Gonzalez-Benecke, C. A., S. A. Gezan, D.J. Leduc, T. A. Martin, W.P. Cropper, and L. J. Samuelson. 2012. Modeling survival, yield, volume partitioning and their response to thinning for longleaf pine plantations. *Forests* 3: 1104-1132.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Japón. 590 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 4 Tierras Forestales. 93 p.
- Magaña T., O. S., J. M. Torres R., C. Rodríguez F., H. Aguirre D., y A. M. Fierros G. 2008. Predicción de la producción y rendimiento de *Pinus rudis* Endl. en Aloapan, Oaxaca. *Madera y Bosques* 14: 5-13.
- Martin, S. W., and G. H. Brister. 1999. A growth and yield model incorporating hardwood competition for natural loblolly pine stands in the Georgia Piedmont. *SAJF* 23: 179-185.
- Martín-Benito, D., G. Gea-Izquierda, M. Del Río and I. Cañellas. 2008. Long-term trends in dominant-height growth of black pine using Dynamic models. *For. Ecol. Manage.* 256: 1230-1238
- Martínez-Salvador, M., R. D. Valdez-Cepeda, y M. Pompa G. 2013. Influencia de variables físicas en la productividad de *Pinus arizonica* y *Pinus engelmannii* en el sur de Chihuahua, México. *Madera y Bosques* 19:35-49.
- Martínez-Zurimendi, P., M. Domínguez-Domínguez, A. Juárez-García, L. M. López-López, V. de la Cruz-Arias y J. Álvarez-Martínez. 2015. Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de *Gmelina arborea* en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38: 415-425.
- Návar, J. 2010. Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. In *Biomass*. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. pp. 27-64.
- Ordóñez J., A. B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago por servicios ambientales. *Ciencias* 90: 37-42.

- Parra-Piedra, J. P., H. M. De los Santos-Posadas, A. M. Fierros-González, J. R. Valdez-Lazalde y J. L. Romo-Lozano. 2017. Proyección explícita e implícita del rendimiento maderable de plantaciones forestales comerciales de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Agrociencia* 51: 455-470.
- Pretzsch, H. 2009. *Forest Dynamics, Growth and Yield: From Measurement to Model*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Germany. 664 p
- Reyes-Muñoz, J. L., O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza, E. Jurado y R. F. González-Laredo. 2011. Modelos de predicción del incremento en volumen para bosques mezclados del estado de Durango, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17: 103-113.
- Santiago G., W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México, Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 78 p.
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, J. J. Corral-Rivas, G. Rodríguez-Ortiz y E. Santiago-García. 2015. Modelos de crecimiento y rendimiento de totalidad del rodal para *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 21: 95-110.
- Santiago-García, W., H. M. De los Santos-Posadas, G. Ángeles-Pérez, J. R. Valdez-Lazalde, y G. Ramírez-Valverde. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 163-172.
- SAS (Statistical Analysis System). 2008. *SAS/STAT 9.0 User's Guide*. SAS Institute Inc. Raleigh, NC USA. 248 p.
- Soriano-Luna, M. A., G. Ángeles-Pérez, T. Martínez-Trinidad, F. O. Plascencia-Escalante y R. Razo-Zárata. 2015. Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* 49: 423-438.
- Spurr, H. 1952. *Forest inventory*. Ronald Press, New York, USA. 476 p.
- Torres R., J. M. 2000. El área de ocupación promedio: una medida de competencia independiente de la distancia. *Agrociencia* 34: 485-495.
- Torres R., J. M. y O. S. Magaña T. 2001. *Evaluación de plantaciones forestales*. Editorial. Limusa. México. 472 p.
- Valles-Gándara, A. G. y R. C. Valadez-Castro. 2006. Evaluación de índices de competencia independientes de la distancia para predecir el crecimiento de bosques mezclados en San Dimas, Durango. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12: 39-44.
- Vanclay, J. K. 1994. *Modelling forest growth and yield, applications to mixed tropical forests*. CAB INTERNATIONAL. Denmark. 312 p.

Vargas-Larreta, B., J. J. Corral-Rivas, O. A. Aguirre-Calderón, J. O. López-Martínez, H. M. De los Santos-Posadas, F. J. Zamudio-Sánchez, E. J. Treviño-Garza, M. Martínez-Salvador, y C. G. Aguirre-Calderón. 2017. SiBiFor: Sistema Biométrico Forestal para el manejo de los bosques de México. RCHSCFA 23: 437–455.

Zeide, B. 2005. How to measure stand density. *Trees* 19: 1-14.

Zepeda E. M. 1990. Predictor de rendimiento de maderables probables de *Pinus patula* Schiedey Deppe., de Perote, Ver., México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo de México, México. 331 p.