

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**DINÁMICA DE BOSQUES DE CONÍFERAS EN DURANGO,  
MÉXICO.**

**TESIS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES.**

**ING. DORIAN DE JESÚS PIMIENTA DE LA TORRE**

**LINARES, NUEVO LEÓN.**

**JULIO, 2005**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

DINÁMICA DE BOSQUES DE CONÍFERAS EN DURANGO,  
MÉXICO.

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES.

ING. DORIAN DE JESÚS PIMIENTA DE LA TORRE

COMITE DE TESIS:



DR. OSCAR A. AGUIRRE CALDERÓN  
PRESIDENTE



DR. JAVIER JIMÉNEZ PÉREZ  
SECRETARIO



DR. EDUARDO J. TREVIÑO GARZA  
VOCAL

LINARES, NUEVO LEÓN.

JULIO, 2005

DEDICATORIA

*Agradezco primeramente a Dios por guiar mi camino y estar conmigo en los momentos difíciles,*

*Y a quienes son la parte esencial de mi existencia:*

*Mi padre*

*Manuel del Carmen Pimienta*

*Mi madre*

*Josefa Eloisa De la Torre de Pimienta*

*Mi hermana*

*Floraba del Carmen*

*Y a mi pequeña sobrina Dámaris Abril*

*A la familia Hernández Martínez*

*A todos ellos gracias por todo su apoyo.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente al pueblo de México, ya que son ellos los que indirectamente proporcionan los recursos a las dependencias y estas las que facilitan las becas para que sea posible la realización de nuestros estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada, mediante la cual culminé mis estudios de posgrado.

A la Facultad de Ciencias Forestales.

Al Dr. Oscar A. Aguirre Calderón que fue el director tesis, por su amistad incondicional, la confianza que deposito en mi para la realización de la tesis y por todo el apoyo proporcionado dentro y fuera de éste proyecto.

Al Dr. Javier Jiménez Pérez por la gran amistad y por la revisión del escrito.

Al Dr. Eduardo J. Treviño Garza por la amistad y la revisión del escrito.

A Dr. Francisco Javier Hernández del ITF del Salto, Durango, por el apoyo proporcionado.

A las secretarías de posgrado: Diana y en especial a Sandra Cano, por todo el apoyo proporcionado durante mi estancia en la Facultad.

De antemano pido me disculpen si involuntariamente he olvidado mencionar a alguien.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
TABLA DE CONTENIDO .....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
RESUMEN .....	vi
SUMMARY .....	viii
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Hipótesis .....	3
1.2. Objetivo general .....	3
1.3. Objetivos específicos .....	3
<b>2. ANTECEDENTES .....</b>	<b>4</b>
2.1. Dinámica forestal .....	4
2.2. Competencia .....	5
2.2.1. Relaciones intraespecíficas .....	8
2.2.2. Relaciones interespecíficas .....	8
2.3. Modelos de crecimiento forestal .....	9
2.3.1. Modelos al nivel del rodal .....	14
2.3.2. Modelos al nivel de árboles individuales .....	15
2.4. Índices de competencia .....	16
2.4.1. Clasificación de los índices de competencia .....	17
2.4.1.1. Índices independientes de la distancia .....	18

---

2.4.1.2. Índices dependientes de la distancia .....	18
2.4.1.3. Características de los índices de competencia .....	19
2.4.1.4. Índices basados en el concepto de espacio disponible para el crecimiento .....	19
2.4.1.5. Índices basados en razones de tamaños ponderados por las distancias .....	20
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. Caracterización del área de estudio .....	21
3.2. Descripción de las especies de coníferas .....	24
3.2.1. <i>Pinus cooperi</i> Blanco .....	24
3.2.2. <i>Pinus durangensis</i> Martínez .....	24
3.2.3. <i>Pinus leiophylla</i> .....	25
3.3. Metodología .....	25
3.3.1. Base de datos .....	25
3.3.2. Evaluación de la competencia interarbórea .....	26
3.3.2.1. Selección de los competidores .....	26
3.3.2.2. Índices de competencia empleados .....	30
3.4. Desarrollo de sistemas para la investigación de la dinámica de bosques de coníferas .....	30
3.4.1. Selección de los índices de competencia .....	30
3.4.2. Modelos de crecimiento forestal .....	30
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>32</b>
4.1. Índice de competencia de Hegyi .....	34
4.2. Índice de competencia de Pukkala y Kolstrom .....	39

---

---

<b>4.3. Índice de competencia del CCSA .....</b>	<b>41</b>
<b>4.4. Índice de competencia de Biging y Dobbertin .....</b>	<b>45</b>
<b>4.5. Competencia entre especies .....</b>	<b>48</b>
<b>5. DISCUSIÓN .....</b>	<b>49</b>
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>52</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>54</b>

---

## ÍNDICE DE CUADROS

	<b>Página</b>
1. Modelos de crecimiento forestal .....	12
2. Índices dependientes de la distancia .....	29
3. Estadísticos de ajuste para el $i_g$ con el $I_c$ de Hegyi .....	33
4. Estadísticos de ajuste para el $i_g$ con el $I_c$ de Hegyi .....	34
5. Estadísticos de ajuste para el $i_g$ con el $I_c$ Pukkala y Kolstrom .....	37
6. Estadísticos de ajuste para el $i_g$ con el $I_c$ del CCSA .....	39
7. Estadísticos de ajuste para el $i_g$ con el $I_c$ de Biging y Dobbertin . .....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
1. Localización geográfica del área de estudio .....	21
2. Esquema del árbol de referencia y competidores .....	27
3. Índice de competencia de Hegyi con el modelo logarítmico .....	35
4. Índice de competencia de Hegyi con el modelo de Fresse .....	37
5. Índice de competencia de Hegyi con el modelo logarítmico .....	38
6. Índice de competencia de Pukkala y Kolstrom con el modelo logarítmico .....	38
7. Índice de competencia de Pukkala y Kolstrom con el modelo Hossfeld .....	38
8. Índice de competencia CCSA con el modelo logarítmico .....	40
9. Índice de competencia CCSA con el modelote Fresse .....	41
10. Índice de competencia CCSA con el modelo de Korf .....	41
11. Índice de competencia CCSA con el modelo de Korsun .....	42
12. Índice de competencia CCSA con el modelo de Hossfeld .....	42
13. Índice de competencia de Biging y Dobbertin con el modelo logarítmico .....	45
14. Índice de competencia de Biging y Dobbertin con el modelo de Fresse .....	45
15. Índice de competencia de Biging y Dobbertin con el modelo de Yoshida .....	46

## RESUMEN

El objetivo general del estudio fue el desarrollo de sistemas metodológicos para la caracterización de los procesos de la dinámica del bosque de coníferas en el Municipio de Pueblo Nuevo, Durango; para ello se emplearon los índices de competencia (Ic) dependientes de la distancia que fueron evaluados a través de modelos de crecimiento y ajustados por el procedimiento de regresión no lineal, de tal manera que permitan obtener los mejores índices para los bosques de coníferas. Se estimó cada Ic dependiente de la distancia para conocer el estatus de competencia de los árboles y predecir la dinámica de crecimiento de los bosques, esto es importante porque dichos índices expresan de manera indirecta la competencia por los recursos como la luz, el agua y los nutrientes, siendo éstos esenciales para el crecimiento y rendimiento de los bosques.

La selección del mejor Ic fue en base a los estadísticos del análisis de varianza obtenidos en los modelos de crecimiento con los diferentes índices de competencia, para observar la respuesta y el grado de exactitud de dichos índices. De los Ic evaluados se encontró que los mejores índices incluidos en un modelo de predicción del incremento en área basal fueron el Ic Crown cross-sectional area (CCSA) ajustándose los modelos de crecimiento de Fresse seguido por el de Korf, presentando un coeficiente de determinación

( $R^2$ ) de 0.2344, un CME de 0.000000160 y el valor F de 424.4658, y para el Ic de Biging y Dobbertin (1992), el modelo logarítmico arrojó un  $R^2$  de 0.2438, un CME de 0.000000183 y un valor de F de 624.55 en los estadísticos de ajuste. Lo anterior es una clara evidencia de que estos Ic ofrecen una mayor eficiencia para modelar el crecimiento en área basal, lo cual se confirma al observar las varianzas de los modelos que presentan los menores valores en el CME, además muestran un nivel de exactitud altamente significativo (Prob.>F=0.0001).

## SUMMARY

The general objective of the study was development of methodological systems for the characterization of the processes development of forest conifers in Pueblo Nuevo, Durango, used distance dependent competition indexes evaluate through models of growth and adjusted by the procedure of non lineal regression, and obtain the best indexes for conifers forests. To estimate each distance dependent competition index for know the competition status of the trees and predict the growth dynamics of these forests, It is important because indexes express indirect way the competition for resources like light, water and nutrients, being these essentials for the growth and yield of forests.

Selection of best competition index was based on the statistical analysis variances, obtained the growth models and observe the answer and exactitude grade of indexes. Evaluated indexes was found that the best index included in model of basal increment area prediction, was the index Crown cross-sectional area (CCSA) adjusted the growth models of Fresse and Korf, adjusted the growth models of Fresse and Korf, present a  $R^2$  0.2344, a CME 0.000000160 and F value 424.4658, and for Biging and Dobbertin (1992), logarithmic model was adjust, these competition indexes fill surface crown area ( $m^2$ ), their statistical adjustment present a determination coefficient ( $R^2$ )

of 0.2344, mean square error (MSE) 0.000000160 and F value of 424.4658 for CCSA and for Biging and Dobbertin (1992) an  $R^2$  of 0.2438, and SME of 0.000000183 and F value of 624.55 respectively. Previous data, indicate that these two competition indexes offers a major efficiency to model for increment basal area, and approve to observe the models of variances that present the minors values in CME, also shows a highly significant level (Prob. 0.0001).

## 1. INTRODUCCIÓN

Los recursos forestales cumplen diversas funciones para la sociedad y consecuentemente deberá ser condición que el manejo se realice sobre bases científicas, lo que constituye un difícil reto. Una tarea importante de la ciencia denominada “manejo forestal” es el desarrollo de herramientas prácticas para utilizar la experiencia acumulada en un paisaje científico muy fragmentado. Por esta razón es esencial que la investigación no se restrinja a resolver problemas específicos, si no que incluya también nuevos métodos para evaluar opciones de manejo y nuevas técnicas para el análisis y evaluación periódica de las practicas forestales ( Gadow *et al.*,2004).

En sí, una buena planificación del manejo forestal requiere proyecciones confiables de crecimiento y rendimiento. Para comprender y controlar sistemas tan complejos como los bosques, se suele recurrir a los modelos.

En el ámbito forestal los modelos de crecimiento tienen un gran número de aplicaciones. Uno de sus principales usos es el de predecir el desarrollo de masas forestales que pueden estar constituidas por varios rodales con diferentes especies y características de sitio, y sometidas a distintos regímenes silvícolas. La evaluación del modelo es por tanto una parte fundamental dentro de las técnicas de modelización del crecimiento (Soares *et al.*, 1995; citado por Gadow y Hui, 1999).

Algunos modelos que se emplean para predecir el crecimiento y rendimiento de rodales irregulares o mezclados, frecuentemente requieren la inclusión de una medida (directa o indirecta) de la competencia interarbórea dentro de un rodal. Tales medidas se conocen como “índices de competencia” y pueden indicar, en términos absolutos o relativos, el nivel de competencia por los recursos, o el grado de estrés de un árbol individual en relación con sus vecinos (Torres-Rojo, 2000).

La modelización del crecimiento y producción forestal es fundamental para la implementación de técnicas de manejo y planeación forestal. El proceso de decisión en el manejo forestal requiere del conocimiento de todas las variables involucradas en el proceso productivo, como también de la evolución de la producción del rodal. Los modelos de simulación son actualmente imprescindibles para el correcto desarrollo de técnicas que buscan obtener la máxima productividad del bosque y la máxima rentabilidad (Sanquetta *et al.*, 1997). Por lo anterior, es de gran importancia poder predecir la dinámica de los bosques de coníferas, ya que estos métodos son herramientas fundamentales para entender la complejidad que caracteriza los sistemas ecológicos y ambientales.

### **1.1. HIPÓTESIS**

La dinámica de los bosques de coníferas pueden representarse mediante modelos matemáticos.

### **1.2. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo general del proyecto es el desarrollo de sistemas metodológicos para la caracterización de los procesos de desarrollo del bosque.

### **1.3. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Generación de metodologías para la evaluación de la competencia interarbórea.
2. Desarrollo de sistemas para la investigación de la dinámica del bosque de coníferas.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Dinámica forestal

Aunque los bosques parecen bastante estáticos en términos de la percepción humana del tiempo, en realidad están en constante cambio (Shugart *et al.*, 1981; citado por Jardel y Sánchez, 1989). La dinámica de los rodales se basa en principios ecológicos que han contribuido a la naturaleza del rodal, como la sucesión, la competencia, la tolerancia y el concepto de zona del óptimo. Estos factores influyen directamente sobre el crecimiento y el desarrollo de un rodal establecido. El conocimiento de las interacciones de estos factores en la dinámica del bosque capacita al técnico para anticipar la forma en que se desarrollará la vegetación y es, por lo tanto, esencial para fundamentar sólidamente las decisiones silvícolas (Daniel *et al.*, 1982).

La predicción de la dinámica de los ecosistemas forestales de acuerdo a sus características de composición de especies, estructura, grado de competencia interarbórea, dimensiones, edad, etc., es de gran importancia para la toma de decisiones sobre el manejo sustentable de estos recursos, permitiendo el análisis del efecto de influencias antropogénicas, así como de procesos de sucesión natural. La formulación de los modelos que representen la relación del incremento con variables estructurales, índices de competencia y características dasométricas de los árboles, constituye un conocimiento básico

para simular correctamente la evolución en el tiempo del sistema, así como anticipar las consecuencias que una determinada acción tiene sobre el mismo, esto es, los modelos representan una herramienta básica para la comparación de alternativas de manejo de ecosistemas forestales (Pretzch, 2001).

Un rodal forestal no es la suma simple de árboles, es una biocenosis formada por numerosos individuos comprendidos en un todo, en el cual rigen una multitud de interacciones. Los individuos de un rodal presentan diferentes ritmos de crecimiento; muchos son eliminados a través de la selección natural o por influencia antropogénica (Klepac, 1976). El desarrollo de los árboles en un ecosistema está influenciado en gran medida por el espacio de crecimiento de que dispone, mismo que está determinado por la competencia que ejercen los árboles vecinos sobre un árbol de referencia dado. La evaluación cuantitativa de la competencia es condición primordial para la investigación de la dinámica de los ecosistemas mixtos multicohortales, principalmente, en los que los individuos experimentan condiciones de desarrollo particulares, dependiendo de los atributos de diversidad y estructura de la comunidad (Gadow y Hui, 1999).

## **2.2. Competencia**

Para desarrollarse, los árboles requieren luz, bióxido de carbono, agua y minerales. La importancia más obvia de la radiación solar en los árboles forestales descansa en la dependencia de la vida sobre la fotosíntesis y la

dependencia que a su vez tiene la fotosíntesis de la luz (Spurr y Barnes, 1982). Un árbol hace mucho más que simplemente incrementar su volumen cuando crece, tiene la habilidad de responder y ajustarse a un amplio rango de cambios en su ambiente; esta habilidad se manifiesta en patrones de dinámica muy variados. Aún no se conocen muchos de los detalles de cómo se regulan estos procesos de adaptación, sin embargo, se acepta que uno de los factores que más influye sobre el crecimiento de un árbol es la interacción espacial con otros árboles (Waring y Running, 1998).

A menudo la competencia es simplemente la obstrucción física al desarrollo de otro árbol que se encuentra lo suficientemente cerca como para afectar a la expansión de su copa (Gadow y Hui, 1999). La competencia entre los árboles dentro de una población existe cuando la disponibilidad de recursos cae por debajo de la suma de los requerimientos de la población para el crecimiento óptimo (Brand y Magnussen, 1988). Según Ford y Sorrensen (1992), citado por Álvarez *et al.*, (2003), esta relación entre crecimiento y competencia se puede sintetizar en cinco axiomas básicos:

- Las plantas modifican su entorno al crecer, reduciendo los recursos disponibles para otras plantas con las que compiten.
- El principal mecanismo de competición es la interacción espacial.

- Como consecuencia de la disminución de los recursos, las plantas ven reducido su crecimiento y el efecto final de la competencia es la muerte.
- Las plantas se adaptan a los cambios de su entorno, responden a la competencia y modifican la naturaleza de la competición.
- En los procesos de competición hay diferencias entre especies.

Por su parte, Harold y Hocker (1984), mencionan que la competencia entre las plantas se presenta cuando dos de ellas tienen demandas, sobre un factor simple, en exceso y que superan la capacidad de dicho factor para satisfacerlas. Si dos plantas de la misma especie y edad ocupan posiciones adyacentes en una localidad, compiten por el agua, la luz y los minerales del suelo. Ambas han evolucionado hacia los mismos requerimientos de nicho y, como continúan creciendo e incrementando su tamaño, cubrirán su natural espacio de crecimiento, eventualmente, una invadirá el de la otra y viceversa.

Por otro lado, si dos plantas de especies diferentes ocupan posiciones adyacentes en una localidad, pueden competir por la luz y la humedad, pero como sus requerimientos minerales son ligeramente diferentes, pueden complementar su abastecimiento de minerales y otras necesidades presentando poca o ninguna competencia, ya que sus requerimientos de nicho evolucionan de diferente forma. Por lo tanto la competencia se presenta entre los individuos de la misma especie (intraespecie) o entre distintos individuos (interespecie).

La interacción competitiva comprende el espacio, alimentos o sustancias nutritivas, luz, acción de los materiales de desecho, depredación mutua. La competencia entre especies, puede traducirse en ajustes de equilibrio por parte de dos especies o podrá conducir a que una sustituya a otra o la obligue a ocupar otro espacio o a servirse de otro alimento (Odum, 1972).

### **2.2.1. Relaciones intraespecíficas**

Algunas plantas podrían vivir verosímilmente aisladas durante cierto tiempo, pero si debe perpetuarse, la planta se hallaría pronto rodeada por sus descendientes con los que entraría en competición o en relaciones de otro género de manera que ya no viviría como un individuo aislado (Odum, 1972).

### **2.2. Relaciones interespecíficas**

La existencia de una planta de otra especie puede ser de importancia decisiva para la obtención de alimento, protección o alguna otra necesidad. Algunas de las relaciones entre las diferentes especies que se establecen en un área determinada son importantes y fácilmente observables, mientras que otras son muy sutiles y sólo con dificultad pueden estudiarse. Algunas de estas reacciones constituyen parte integrante de la actuación del complejo ecológico como un todo, en tanto que otras sólo revisten importancia secundaria (Odum, 1972).

Dentro del ámbito forestal, el efecto que ejerce la competencia sobre el crecimiento de los individuos ha sido analizado en las últimas décadas con objeto de conseguir ecuaciones de predicción del crecimiento lo más rigurosas y precisas posibles (Tomé & Burkhart, 1989). Se han realizado numerosos estudios para tratar de cuantificar el efecto de la competencia sobre el crecimiento de los árboles. Para ello se desarrollaron los llamados “Índices de competencia”, que son fórmulas matemáticas que relacionan diversas características de un árbol y de sus competidores por ejemplo, diámetro del fuste y/o de la copa, etc. para tratar de predecir el crecimiento del individuo (Jerez *et al.*, 1999).

### **2.3. Modelos de crecimiento forestal**

Un modelo matemático es como un modelo verbal, pero expresado en lenguaje matemático. El lenguaje matemático difiere del lenguaje natural en que es más conciso y menos ambiguo. Esto, junto con la disponibilidad de reglas que se pueden usar mecánicamente, permite razonar en situaciones más complejas, con menos esfuerzo, y con menos riesgo de confundirse (García, 2003). Según Andenmatten y Letourneau (2002), una característica deseable de cualquier sistema de estimación y predicción, es que sea flexible, es decir que se adapte a una gran variedad de preguntas posibles.

El estudio de los modelos de crecimiento, representan para la silvicultura una herramienta útil para definir el manejo correcto de los rodales y crear las condiciones necesarias para que los bosques sean manejados bajo esquemas de producción sostenida con criterios sustentables (Valles *et al.*, 2003).

Los modelos de crecimiento representan una expresión promedio de cómo crecen los árboles y como se modifican las estructuras de los bosques. El nivel de detalle de estos modelos difiere grandemente; los modelos de árboles se ocupan por ejemplo de detalles morfológicos de las ramas, la forma del fuste y el crecimiento de las raíces. Los modelos de producción regionales y los de crecimiento de rodales producen información integral sobre el desarrollo de una población de árboles de acuerdo a condiciones ambientales y modificaciones intermitentes de los atributos de tales ecosistemas por interferencia humana u otros disturbios (Oliver y Larson, 1990).

Las funciones o ecuaciones de crecimiento describen las variaciones que experimenta el tamaño de un organismo o una población con la edad. El crecimiento biológico, que es el resultado de un gran número de procesos complejos, puede resumirse de una forma muy simple, particularmente cuando el organismo o población analizada es un árbol o masa forestal (Docando *et al.*, 2003).

En el caso de los árboles, su crecimiento es el resultado de la interacción entre dos factores opuestos (Zeide, 1993; citado por Docando op. cit.): por una parte, está la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado, que depende del potencial biótico del individuo, de su actividad fotosintética, de la absorción de nutrientes, de los procesos catabólicos y anabólicos, etc.; en el lado opuesto se encuentran las restricciones al crecimiento, impuestas por el entorno en el que se desenvuelve dicho individuo (competencia con otros organismos, limitación de recursos, procesos respiratorios y estrés) y por su propia condición de ser vivo (mecanismos de autorregulación del crecimiento y envejecimiento).

Si se representa la evolución en el tamaño (diámetro, altura, área basimétrica volumen, etc.) de un árbol o de una masa forestal a lo largo de su vida se obtiene una curva, denominada *sigmoide*, cuyo patrón se mantiene sorprendentemente estable, con independencia de la especie de que se trate o de los cambios y fluctuaciones del entorno en que se desarrolle. La curva *sigmoide* presenta dos características fundamentales, que derivan de la interacción entre los dos factores opuestos que condicionan el crecimiento, tiene un punto de inflexión y una asíntota horizontal (Docando op. cit.).

Kiviste (1988); citado por Prodan et al., 1987), describe 75 ecuaciones de crecimiento. Sin embargo, sólo unas cuantas han probado ser las mejores y más populares. Entre ellas, según Zeine (1993) y García (1983), están la función de Chapman-Richards y sus derivaciones, la función de Schumacher y

su derivación que corresponde a la función de Korf, y otros múltiples modelos (cuadro 1) todos con la propiedad de presentar una forma integral (rendimiento) y una forma diferencial (crecimiento), (citado por Prodan op cit.).

Cuadro 1. Modelos de crecimiento forestal.

Nombre del modelo	Ecuación
Schumacher	$Y = ae^{b/t^c}$
Chapman-Richards	$Y = a(1 - e^{-bt})^c$
Gompertz	$Y = ae^{-b^{-ct}}$
Korf	$Y = ae^{-bt^{-c}}$
Logístico	$Y = a / (-1 + ce^{-bt})$
Weibull	$Y = a(1 - e^{-bt})$
Hossfeld IV	$Y = t^c / (b + t^c / a)$
Yoshida I	$Y = at^d / (b + t^d) + c$
Monomolecular	$Y = a(1 - ce^{-bt})$
Logarítmico	$Y = a_0 + a_1 * \log(d)$
Polinomio de 2º grado	$Y = a_0 + a_1 * d + a_2 * d^2$
Prodan	$Y = 1.3 + \frac{d^2}{a_1 + a_2 * d + a_2 * d^2}$
Petterson	$Y = 1.3 + \left( \frac{d}{a_0 + a_1 * d} \right)^2$
Korsun	$Y = e^{(a_0 + a_1 * \ln(d) + a_2 * \ln(d^2))}$
Fresse	$Y = e^{(a_0 + a_1 * \ln(d) + a_2 * d)}$
Michailoff	$Y = a_0 * e^{(a_1/d)} + 1.3$
Van Laar	$Y = e^{(a_0 + a_1/d + a_2/d^2)}$
Bertalanffy	$Y = a(1 - e^{-bt})^3$

---


$$\text{Levakovic I} \quad Y = a(t^d / (b + t^d))^c$$

$$\text{Sloboda} \quad Y = ae^{-bc^{td}}$$


---

Variables donde:

Y = Altura total

d = Diámetro normal (1.30 m)

t = Edad

log = Logaritmo base 10

ln = Logaritmo natural

e = Exponencial

a,b,c,d = Parámetros estadísticos

Todas las funciones anteriores presentan un punto de inflexión y una asíntota, por lo tanto, la elección de cualquiera de ellos va depender de la calidad del ajuste de los datos. La tendencia hoy en día no es ajustar funciones de rendimiento sino funciones de crecimiento y luego integrarlas para obtener estimaciones de rendimiento (Prodan *et al.*, 1997).

Los tipos más comunes de modelos de dinámica de ecosistemas forestales pueden agruparse en (Davis *et al.* 2001):

- a) modelos altamente agregados, volumen sobre edad, para la predicción de la producción a nivel regional;

- b) modelos de rodal para predicción del área basal en función de la edad y el área basal inicial;
- c) modelos de clases dimensionales para la predicción de la dinámica de las distribuciones diamétricas, y
- d) modelos de árbol individual que requieren información espacial.

### **2.3.1. Modelos al nivel del rodal**

Los modelos a nivel de rodal caracterizan el estado del rodal con unas pocas variables que representan agregados a nivel de rodal, tales como área basal, diámetro medio, volumen por hectárea, árboles por hectárea, espaciamiento medio, altura dominante, etc. (García, 2003). Estos modelos predicen el crecimiento del conjunto de árboles dentro del rodal, algunos que describen la forma sigmoide del crecimiento incluyen funciones ponderadas por la calidad de sitio o potencial productivo y el crecimiento en área basal (Clutter *et al.*, 1983).

### **2.3.2. Modelos al nivel de árboles individuales**

Los modelos de crecimiento de árbol individual con distribución espacial se basan en las distancias y tamaños de los árboles vecinos para estimar la dinámica de un árbol concreto, combinando el efecto de esa información en lo que se denomina competencia o densidad puntual (Gadow y Hui, 1999). Estos modelos se basan en la predicción del crecimiento individual de cada uno de los

árboles que componen la masa forestal. Estos pueden o no considerar factores de competencia y por ende se denominan dependientes o independientes de la distancia (Vanclay, 1994).

Martin y Ek (1984) y Biging y Dobbertin (1992) expresan que el crecimiento por modelos empíricos deben incluir factores de competencia entre individuos. Los factores de competencia generalmente se estiman a partir de distancia, las características dasométricas de árboles vecinos y crecimiento radial, en altura o en volumen. Martin y Ek (1984) mencionan que los modelos de árboles individuales pueden ser empíricos si su poder descriptivo se basa en las correlaciones observadas entre la variable dependiente y las independientes, o semiempírico si su poder descriptivo se deriva tanto de las correlaciones observadas como de suposiciones teóricas acerca del comportamiento biológico del crecimiento y rendimiento de los árboles individuales.

#### **2.4. Índices de competencia**

Algunos modelos que se usan para predecir el crecimiento y el rendimiento de rodales irregulares o mezclados, frecuentemente requieren la inclusión de una medida (directa o indirecta) de la competencia interarbórea dentro del rodal. Tales medidas se conocen como “índices de competencia” y pueden indicar, en términos absolutos o relativos, el nivel de competencia por recursos, o el grado

de estrés de un árbol individual en relación con sus vecinos (Torres-Rojo, 2000).

Los índices de competencia estiman de manera indirecta, a través de relaciones de competencia simples o complejas, el estrés entre los individuos arbóreos por recursos, tales como luz, agua y nutrientes, y posteriormente incorporados en un modelo de predicción estudian su efecto en el crecimiento de los árboles y su mortalidad. El uso de estos índices, es proyectar el crecimiento de los árboles en el rodal forestal con base en la competencia presente. Generalmente expresan valores relativos, como la relación del área basal del rodal con el área basal de cada árbol dentro de una zona de competencia; ya sea empleando ciertos atributos de los árboles, en este caso longitudes y amplitudes de copa, alturas, o bien, índices no tan simples que consideran la distancia de los vecinos más cercanos y posteriormente estudiar su relación con el crecimiento potencial y la mortalidad (Valles e Islas, 2000).

Se han desarrollado numerosos índices para cuantificar la competencia entre árboles. Muchos de ellos se basan en analizar las alteraciones que provoca la existencia de árboles cercanos en el área potencial de crecimiento de un árbol concreto, utilizando información espacial en dos o incluso en tres dimensiones (Clutter *et al.*, 1983; Tome y Burkhart, 1989; Pukkala, 1989; Holmes y Reed, 1991; Biging y Dobbertin, 1992, 1995; Vanclay, 1994; Gadov y Hui, 1999).

En México el primer trabajo reportado sobre estudios de competencia para especies mexicanas fue el de Rodríguez (1987), seis años después Romero (1993) estudió relaciones de competencia en *Pinus patula*, posteriormente Valles en (1994) trabajó con índices de competencia para *Pinus cooperi* Blanco en San Dimas, Durango (Citados por Valles e Islas, 2000), Valles *et al.* (1998), estudiaron la relación de nueve índices de competencia con el crecimiento en diámetro de *Pinus cooperi* Blanco; Torres-Rojo (2000), evaluó el área de ocupación promedio: Una medida de competencia independiente de la distancia, y Valadez (2004), evaluó índices de competencia independientes de la distancia para predecir el crecimiento de especies mezcladas en San Dimas, Durango.

#### **2.4.1. Clasificación de los índices de competencia**

Se consideran dos tipos de índices de competencia, según la clásica división de Munro (1974); citado por Vázquez *et al.*, (2003):

##### **2.4.1.1. Índices independientes de la distancia**

En estos modelos los efectos de la competición son introducidos a través de funciones simples de las variables de parcela o de dimensiones de los individuos. Tomé & Burkhart (1989), mencionan que los índices independientes de la distancia estiman un solo valor como medida de competencia para toda la

parcela o rodal. Estos índices no requieren de coordenadas, usan distribuciones diamétricas en varias formas o tamaños (García, 2003).

#### **2.4.1.2. Índices dependientes de la distancia**

En este caso el efecto competitivo se expresa a través de funciones matemáticas que tienen en consideración las dimensiones y localización de una serie de individuos circundantes que son seleccionados como competidores teniendo en cuenta una determinada regla empírica. En caso de que la regla de selección de competidores deseche como tales aquellos árboles de menores dimensiones el proceso de competencia se denomina unilateral, mientras que si son seleccionables todos los árboles circundantes la competencia es bilateral. Por su parte Tomé & Burkhart (1989), mencionan que estos índices incorporan medidas de distancia o de tamaño entre el árbol sujeto y sus competidores. También incluyen diámetro, a veces altura y dimensiones de copa, para todos los árboles en una parcela de muestra (García, 2003).

Por otra parte, en base a la aplicación de los índices de competencia y debido a la gran variedad de métodos que existen para su estimación en el campo de la silvicultura, los índices de competencia dependientes de la distancia pueden ser exactos de acuerdo a lo que reporta la literatura internacional pero el uso de dichos índices puede estar restringido; ya que requieren más información de campo para la estimación de la competencia (Valles *et al.*, 2002).

### **2.4.1.3. Características de los índices de competencia**

#### **2.4.1.4. Índices basados en el concepto de espacio disponible para el crecimiento**

El empleo de índices para tratar de describir la competencia o densidad puntual entre árboles es una constante en la literatura forestal desde hace más de 150 años. Uno de los primeros índices es el denominado espacio disponible para el crecimiento de Seebach (1846) que define como el cociente entre el diámetro de la copa de un árbol ( $D_{\text{copa}}$ ) y su diámetro normal ( $d$ ), cuanto más pequeño sea el valor de este índice, mayor es la competencia a la que está sometido el árbol (Gadow y Hui, 1999).

#### **2.4.1.5. Índices basados en razones de tamaños ponderadas por las distancias.**

Este grupo de índices permiten cuantificar la competencia entre árboles y se basan en considerar que el efecto de la competencia que ejercen sobre un árbol concreto los individuos que le rodean aumenta cuando se incrementa el tamaño de estos últimos y cuando se reduce la distancia que los separa del árbol analizado (Gadow y Hui, 1999). La variable más sencilla de medir en campo relacionada con el tamaño de un árbol es su diámetro normal, y es la base del índice de competencia propuesto por Hegyi (1994).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Caracterización del área de estudio

El presente estudio se realizó en la región de El Salto, municipio de Pueblo Nuevo, Durango, en el ejido La Victoria, ubicado al Sudoeste de este Estado. Está enmarcado geográficamente entre los paralelos  $23^{\circ} 40' 04''$  y  $23^{\circ} 47' 54''$  de latitud norte y los meridianos  $105^{\circ} 21' 31''$  y  $105^{\circ} 29' 52''$  de longitud oeste figura 1.

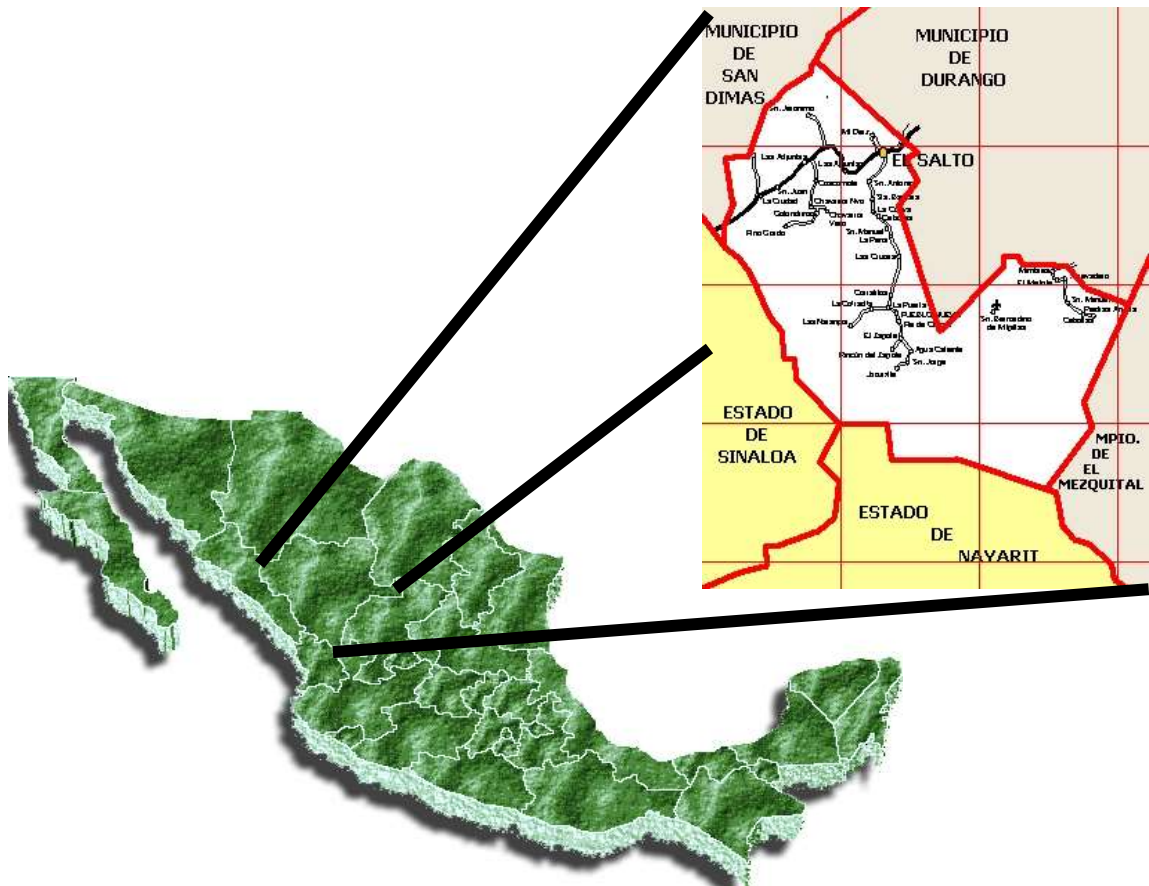


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

Según el Reporte de la Auditoría Anual (2004), las condiciones climáticas, fisiográficas y de vegetación, el Estado de Durango se encuentra dividido en cuatro regiones fisiográficas, que se presentan en fajas más o menos paralelas con dirección noroeste a sureste. Estas son: la región de las Quebradas, la región de la Sierra Madre Occidental, la región de los Valles y la región Oriental.

La región de la Sierra Madre Occidental, en la que se encuentra ubicado el ejido La victoria, se caracteriza por constituir el parteaguas que divide a la vertiente del Océano Pacífico de la vertiente interior u oriental, en el que se presentan las mayores elevaciones del Estado. La altitud media es de 2,600 msnm y las máximas alturas alcanzan los 3,000 msnm.

La altura promedio en el ejido es de 2,200 msnm con poca variación superior e inferior. Su posición dentro del parteaguas le confiere un papel importante en la región, desde una perspectiva de manejo de cuencas.

El clima preponderante en la región es C(w2) y C(e)(w2), templado subhúmedo con lluvias en verano y templado extremoso, de acuerdo a la clasificación de Köepen modificado por García (1970). Según la estación meteorológica más cercana se reporta una precipitación media anual de 800 mm.

El ejido se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 11 (Presidio-San Pedro), Cuenca (D), Río Presidio, y en la subcuenca (c). Dentro del ejido existe

una gran cantidad de arroyos que en su mayoría llevan agua sólo en época de lluvias.

Las principales topoformas que se encuentran en el área son ondulaciones y mesetas. Aproximadamente el 41% de las formas fisiográficas se consideran planas, el 19% onduladas, el 30% laderas y el 10% lomeríos. De acuerdo a esto, un poco más del 58% de las pendientes tienen un rango de entre 0 a 20%; el 31% un rango del 20 al 40% y el 11% con pendientes mayores a 41%.

De acuerdo con la carta edafológica de INEGI los suelos del predio son de tipo cambisol, regosol y litosol con textura predominantemente gruesa a media. En general la capa de materia orgánica del suelo presenta un espesor de entre 0 a 5 cm. y con este rango cubre aproximadamente el 98% del predio. La compactación del suelo se considera regular en un 65% del área del ejido.

La vegetación en la mayor parte del predio está formada por bosques de pino-encino, con distintas calidades de estación. Las principales especies de pino son *P. cooperi* Blanco, *P. durangensis* Martínez y *P. leiophylla*. No se tienen determinadas las especies de encinos y para fines de aprovechamiento sólo se consideran como *Quercus spp.* Existen otras coníferas como *Juniperus sp.* y dentro de las latifoliadas se encuentran especies del género *Arbutus* y, en el estrato inferior de los bosques, manzanita (*Arctostaphylos sp.*) en diferentes densidades.

## **3.2. Descripción de las especies de coníferas**

### **3.2.1. *Pinus cooperi* Blanco**

Árbol de 15 a 35 metros de altura y de diámetro de 30 a 80 cm; copa densa, redondeada o cónica, formada por ramas gruesas de forma sigmoidal, descendentes, la copa puede ser irregular; corteza rugosa de gris a gris oscuro. Hojas en fascículos de 3 a 5 generalmente de 5, de color verde oscuro o verde ceniciento, gruesas y tiesas y fuertes, generalmente curvadas de 4 a 9 cm de largo. Cono ovoide de 4 a 9 cm de longitud (Martínez, 1992).

### **3.2.2. *Pinus durangensis* Martínez**

Árbol de fuste recto de 15 a 40 m de altura y hasta de 1 a 1.5 m de diámetro. Corteza rugosa, dividida en grandes placas escamosas de color café rojizo pálido en la parte media y separadas por fisuras. Hojas en fascículos de 6 frecuentemente de vaina persistente, medianamente gruesas de 14 a 30 cm de largo y de 0.6 a 1 mm de ancho. Conos ovoides o cónico ovoides, se presentan en pares o en grupos de 3, miden de 7 a 9 cm de largo y tienen un color moreno rojizo. Semillas pequeñas con ala, de color gris, de 5 a 7 mm de largo. Se localiza principalmente en altitudes de 2500 a 2800 msnm, se asocia con *P. cooperi*, *P. teocote*, *P. cooperi ornelasi*, *P. herrerae* y *P. leiophylla* entre otros (Martínez, 1992).

### **3.2.3. *Pinus leiophylla***

Árbol de 15-25 m de alto, copa irregular y algo rala; corteza delgada al principio y después gruesa, muy áspera y rugosa, de color ceniciento primero a casi negra después; con retoños a lo largo del tronco y a veces también en las ramas primarias, las cuales suelen comenzar a poca altura. Las hojas se presentan en fascículos de 5, aglomerados en la extremidad de la ramilla; miden de 8-13 (15) cm, muy finas y delgadas de color verde grisáceo a veces con tintes amarillentos, bordes aserrados, con dienteillos muy pequeños y juntos. Conos ovoides, frecuentemente algo puntiagudos, ligeramente asimétricos y más o menos reflejados de 4-6 (8.5) cm de largo. Semilla triangular, ligeramente redondeada de 4 mm, con ala de 12 mm, amarillenta, con estrías obscuras. Localizándose en altitudes de 1600 y 2800 msnm, asociado con otros pinos y encinos, ocupa laderas con exposiciones secas o húmedas y cañadas (Martínez, 1992).

## **3.3. Metodología**

### **3.3.1. Base de datos**

La datos se obtuvieron de 8 sitios permanentes de muestreo de 5000 m<sup>2</sup> (100mx50m), donde predominan principalmente *Pinus cooperi*, *P. durangensis* y *P. leiophylla*, en las cuales se estableció una franja de 8 m con objeto de

eliminar el efecto de borde de las parcelas de dimensiones fijas y limitar la superficie de los árboles de referencia para la evaluación de la competencia, en esta superficie se establecieron 50 cuadrantes de 100 m<sup>2</sup>, obteniendo de cada sitio la distribución espacial de cada árbol, es decir, sus coordenadas (x,y), así como los datos dasométricos del arbolado (diámetro a 1.30 m, altura total, altura de fuste limpio, longitud de los últimos 10 anillos, longitudes de copa N, S, E, O, NE, SE, NO, SO) e incremento en área basal (obtenido del incremento diamétrico).

### **3.3.2. Evaluación de la competencia interarbórea**

#### **3.3.2.1. Selección de los competidores**

Para la selección de los competidores se empleó el criterio de Hegyi (1974), el cual considera como competidores a todos los árboles incluidos dentro de un círculo con un radio de 10 pies (3.05 m) cuyo centro coincide con el árbol analizado. Se evaluó así mismo el criterio de Lee y Gadow (1997), quienes propusieron una nueva metodología de elección de competidores que sí tiene en cuenta la posición de los árboles ya seleccionados. Inicialmente se considera competidores potenciales a todos los árboles incluidos dentro de un área denominada zona específica de competencia (CZ), que para cada árbol de referencia se define como un círculo de radio CZR.

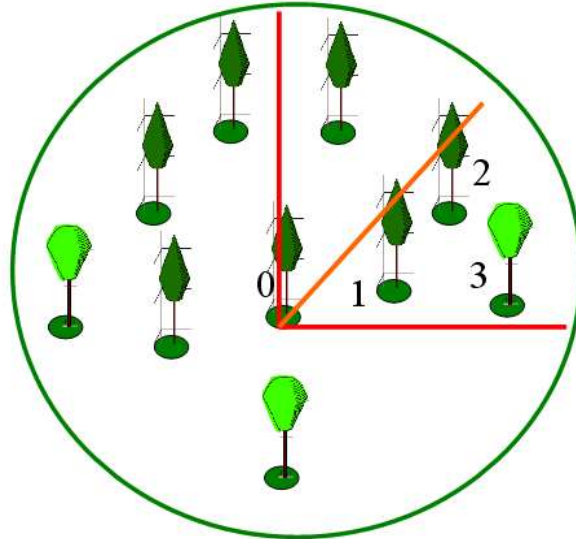
$$CZR = k \cdot \sqrt{\frac{10000}{N}}$$

Variables donde:

K = constante que define el radio de la zona de competencia ( $2 < k < 4$ )

N = número de árboles por ha.

Posteriormente, se selecciona como primer competidor activo el árbol más cercano al de referencia, descartando todos los demás que se encuentren situados detrás de él en un sector circular denominado sector de eliminación de competencia, que está definido por un cierto ángulo ( $\alpha$ ) denominado ángulo de eliminación de competencia (fig. 2).



**Figura 2.** Esquema con el árbol de referencia (0) y tres competidores potenciales (1, 2 y 3). El árbol número 1 es el más cercano y es seleccionado como un competidor activo. Los árboles 2 y 3, localizados detrás del primero no son competidores activos.

El ángulo de eliminación de competencia que se empleo fue de 45°, esto concuerda con lo obtenido por Álvarez (1998), en Galicia, España, donde se analizaron 10 técnicas diferentes de elección de competidores y los mejores resultados se obtuvieron con este método, empleando un ángulo de eliminación de competencia de 45°.

Una vez determinado el CZR y el ángulo de eliminación de competencia se procedió a seleccionar los competidores, el procedimiento se repitió iterativamente para cada uno de los árboles próximos al de referencia, “moviendo” el ángulo y el sector de eliminación de competencia hasta cubrir toda el área de competencia.

### **3.3. 2.2. Índices de competencia empleados**

Una vez determinados los competidores de cada parcela se evaluaron los siguientes índices de competencia como los de relaciones dimensionales ponderadas por distancia (cuadro 2).

**Cuadro 2.** Índices dependientes de la distancia.

Índices de competencia	Ecuación
Hegyi (1974)	$HgCI_i = \sum_{j=1}^n \frac{D_j / D_i}{Dist_{ij}}$
Bigging y Dobbertin (1992)	$M = \sum_{j=1}^N \frac{M_j}{M_i \cdot (Dist_{ij} + 1)}$
Pukkala y Kolstrom (1987)	$\sum_{i \neq j} \frac{h_i}{h_j * Dist_{ij}}$
Crown cross-sectional area (CCSA)	$\sum_{i \neq j} \frac{CC_j}{CC_i * Dist_{ij}}$

Variables donde:

D<sub>j</sub>= Diámetro normal del árbol competidor

D<sub>i</sub>= Diámetro del árbol de referencia i

Dist<sub>ij</sub>= Distancia entre el árbol de referencia i y el competidor j

n = Número de árboles competidores

M= Área superficial de la copa (m<sup>2</sup>)

H= Altura

CC= Área superficial de la copa (m<sup>2</sup>)

### 3.4. Desarrollo de sistemas para la investigación de la dinámica de bosques de coníferas.

### **3.4.1. Selección de índices de competencia**

La selección del mejor índice de competencia fue en base a los estadísticos del análisis de varianza obtenidos en los modelos de crecimiento con los diferentes índices de competencia para observar la respuesta y el grado de exactitud de dichos índices. Los estadísticos empleados para evaluar los índices fueron el cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y el valor de F. Respecto al estadístico CME concuerda con lo señalado por Martin y Ek, (1984); Biging y Dobbertin, (1992); Valles e Islas, (2000); Valles *et al.*, (2003) y Valadez, (2004), quienes utilizan dicho estadístico en sus estudios para la evaluación de los índices de competencia. Así como también emplean el  $R^2$  en sus estudios para cuantificar índices de competencia (Tomé y Burkhart, 1989; Valles e Islas, 2000; Valles *et al.*, 2003; Valadez, 2004) y concuerda con el criterio aplicado en esta investigación.

### **3.5. Modelos de crecimiento forestal**

A partir de la caracterización estructural del bosque y la determinación de índices de competencia de árboles individuales, se emplearon modelos de crecimiento para evaluar los índices de competencia y predecir el incremento en área basal para el bosque de coníferas, validándose las relaciones entre el grado de competencia y el incremento del área basal individual. Se emplearon procedimientos de regresión no lineal y fueron ajustados por el paquete

estadístico STATISTICA® para corroborar la eficiencia de dichos modelos, ya que con este procedimiento se puede estimar el incremento y modelar la dinámica del bosque. Lo anterior permitió obtener los índices de competencia más adecuados de acuerdo a los parámetros estructurales.

La investigación de la dinámica del bosque mediante el sistema antes enunciado, permitirá realizar predicciones sobre el desarrollo del bosque generando procedimientos de simulación. El objetivo de esta última fase del trabajo no es la generación de un simulador de crecimiento, si no la formulación de los modelos que reproduzcan las relaciones funcionales antes descritas a nivel de especie o grupos de especies y de su condición estructural, lo cual permitirá una mayor flexibilidad y aplicación.

Para la evaluación de la dinámica de los ecosistemas se emplearon los modelos de crecimiento forestal mencionados en antecedentes en el cuadro 1.

#### 4. RESULTADOS

Los índices de competencia dependientes de la distancia que a continuación se presentan, utilizan los diámetros y las alturas como variables de inclusión en la evaluación de la competencia.

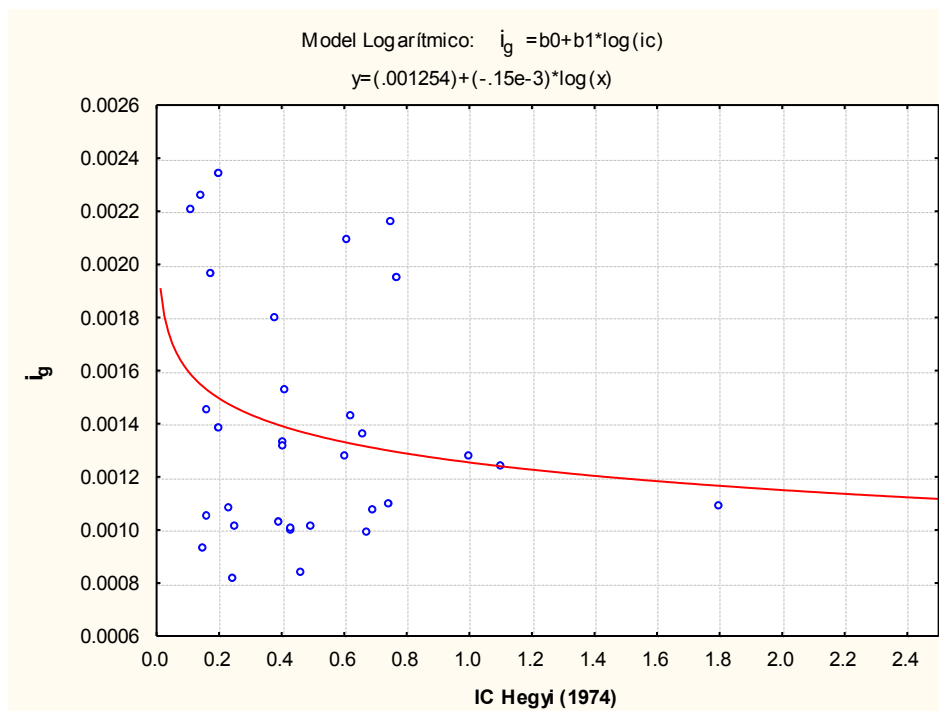
Procesados los datos y obtenidos los índices de competencia ( $I_c$ ) dependientes de la distancia, se encontró para el índice de Hegyi (1974) seleccionado con el criterio de 10 pies de radio y evaluado con los modelos de crecimiento antes mencionados, este índice arrojó bajos coeficientes de determinación ( $R^2$ ) con valores de 0.05, en este caso el modelo explica en un 5% la variación del incremento en área basal en función del índice de competencia empleado (cuadro 3).

**Cuadro 3.** Estadísticos de ajuste para el  $i_g$  con el  $I_c$  de Hegyi (1974).

Estadísticos de ajuste para el $i_g$			
IC Hegyi (1974)			
Modelo	CME	$R^2$	Valor F
Hossfeld	0.000000207	0.0521	97.6699
Logarítmico	0.000000200	0.0482	150.8744
Yoshida	0.000000214	0.0482	70.41

En el cuadro anterior se observa la varianza de los modelos que presentan valores de 0.000000207, 0.000000200 y 0.000000214, en los CME.

En la siguiente figura se presenta el modelo de  $i_g$  con el índice de competencia de Hegyi (1974); se observa que el modelo no explica la interacción del incremento en diámetro respecto a la competencia ejercida por los árboles vecinos (fig. 3).



**Figura 3.** Ic de Hegyi (1974) con el modelo logarítmico.

Respecto a los índices de competencia evaluados con el criterio de Lee y Gadow (1997), los resultados fueron los siguientes:

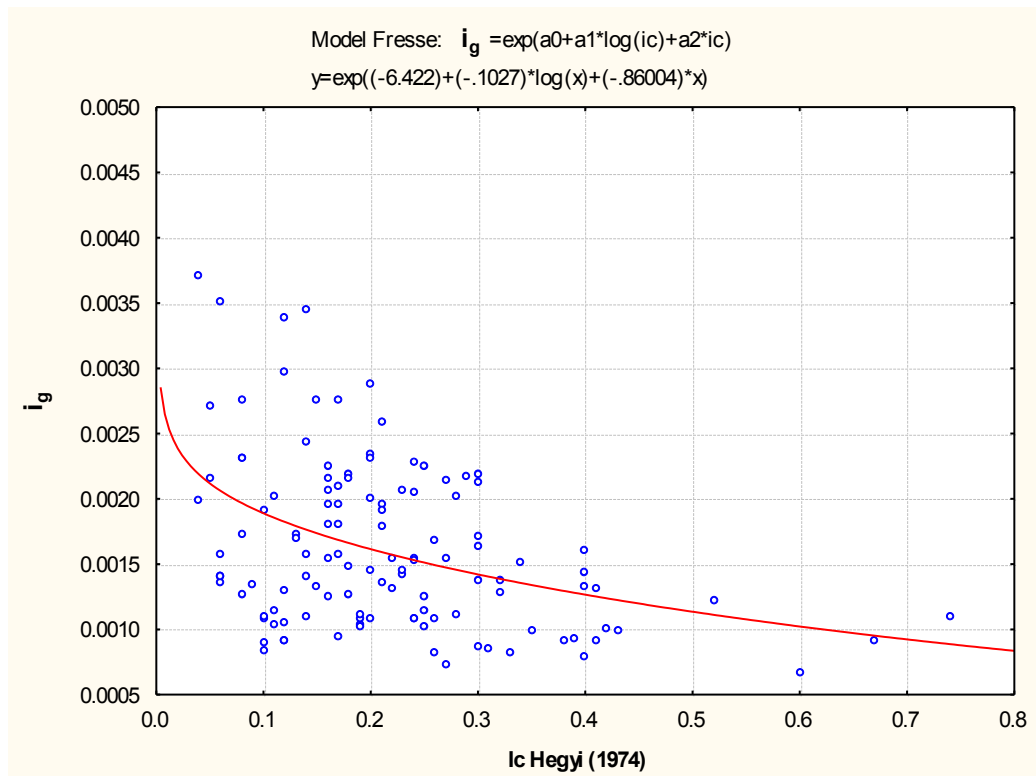
En el cuadro 4 se presenta el índice de competencia de Hegyi (1974) evaluado con los mismos modelos de crecimiento, se observa que los valores de los estadísticos de ajuste:  $R^2$ , CME y el valor de F, ajustados por el número de variables indican que el modelo de Fresse presenta el mejor ajuste, ya que arrojó un  $R^2$  de 0.1559, un CME de 0.000000359 y un valor de F de 301.4576; seguido del modelo logarítmico que presenta un CME similar, pero con una ligera variación en el  $R^2$  y un valor superior en el estadístico F= 453.7744. De hecho todos los modelos presentan una ligera variación en los CME y  $R^2$ , explicando de un 15 a 16% la variación del incremento en área basal en función del índice de competencia.

**Cuadro 4.** Estadísticos de ajuste para el  $i_g$  con el  $I_c$  de Hegyi (1974).

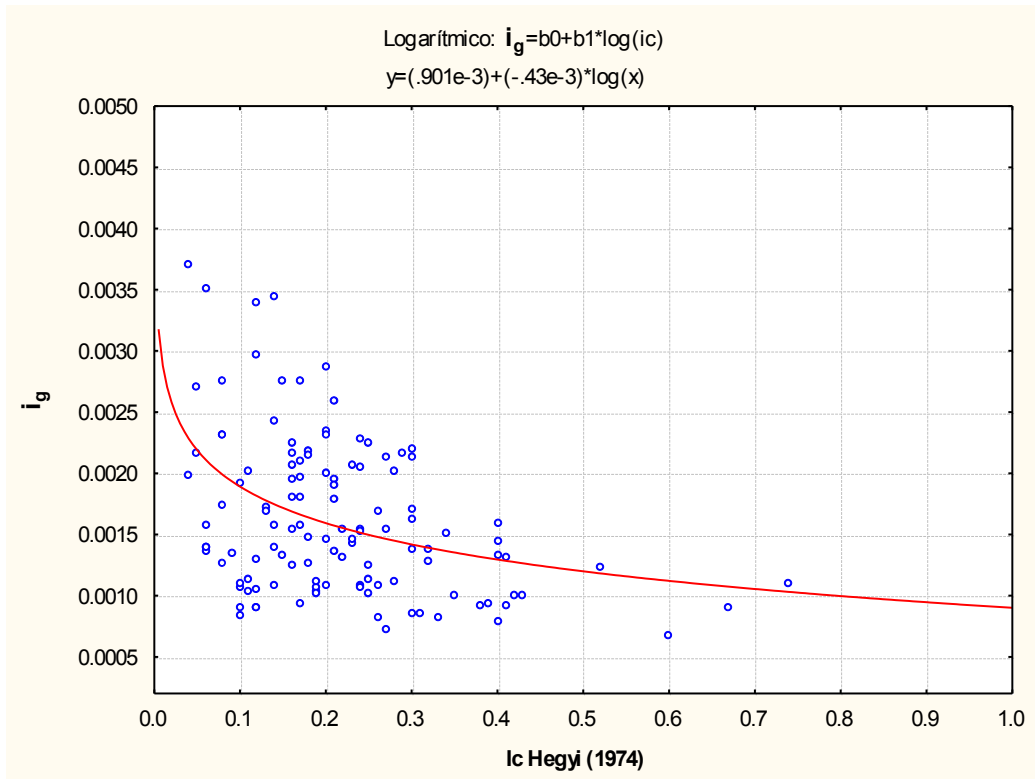
<b>Estadísticos de ajuste para el <math>i_g</math></b>			
<b>IC Hegyi (1974)</b>			
<b>Modelo</b>	<b>CME</b>	<b><math>R^2</math></b>	<b>Valor F</b>
<b>Fresse</b>	0.000000359	0.1559	301.4576
<b>Logarítmico</b>	0.000000359	0.1521	453.7744
<b>Korf</b>	0.000000363	0.1471	297.9662
<b>Korsun</b>	0.000000361	0.1504	299.2405
<b>Hossfeld</b>	0.000000364	0.1521	223.0388

Lo anterior se corrobora al observar la varianza de los modelos, ya que muestran valores altos en los CME y bajos coeficientes de determinación, sin embargo son altamente significativos ( $p > F = 0.001$ ).

En las siguientes figuras se presentan los índices de competencia con los modelos ajustados, en el cual se puede apreciar claramente que a medida que los árboles alcanzan mayor competencia su incremento en área basal decrece y cuando la competencia es menor el  $i_g$  aumenta, de manera que este modelo puede predecir la dinámica del bosque respecto a la competencia ejercida por los árboles de una población (fig. 4 y 5).



**Figura 4.** Ic de Hegyi (1974) con el modelo de Fresse.



**Figura 5.** Ic de Hegyi (1974) con el modelo logarítmico.

Para el índice de competencia de Pukkala y Kolstrom (1987), el modelo que presentó mejor ajuste fue el logarítmico con un  $R^2$  de 0.1836, un CME de 0.000000247 y un valor de F de 278.4298, pero el modelo de Hossfeld también presenta buenos ajustes ya que muestra una ligera variación en el CME, en el coeficiente de determinación y un valor de F superior al modelo logarítmico (cuadro 5).

**Cuadro 5.** Estadísticos de ajuste para el  $i_g$  con el Ic Pukkala y Kolstrom (1987).

<b>Estadísticos de ajuste para el <math>i_g</math></b>			
<b>IC Pukkala y Kolstrom (1987)</b>			
<b>Modelo</b>	<b>CME</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Valor F</b>
<b>Logarítmico</b>	0.000000247	0.1836	278.4298
<b>Hossfeld</b>	0.000000249	0.1668	413.5109

En este cuadro se corrobora la varianza de los modelos, en los cuales se observa valores más bajos en los CME y los  $R^2$  que explican en un 17 a 18% la interacción de la variable dependiente en este caso el incremento en área basal con respecto a la variable independiente en este caso la competencia.

En las siguientes figuras se observa que a mayor competencia el incremento en área basal decrece, aumentando cuando la competencia entre los árboles es menor (fig. 6 y 7).

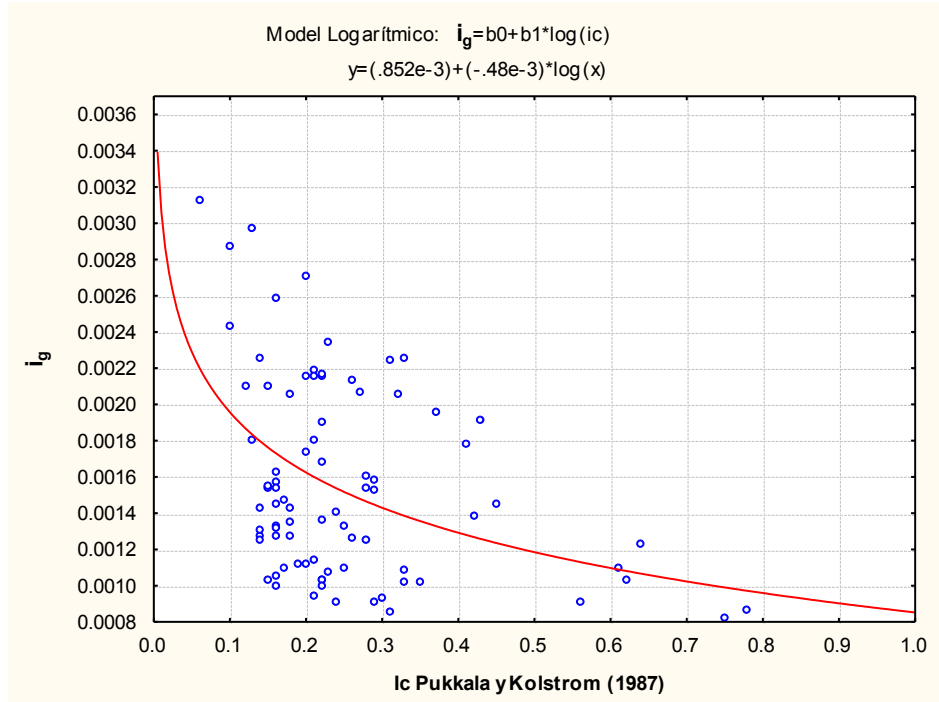


Figura 6. Ic de Pukkala y Kolstrom (1987) con el modelo logarítmico.

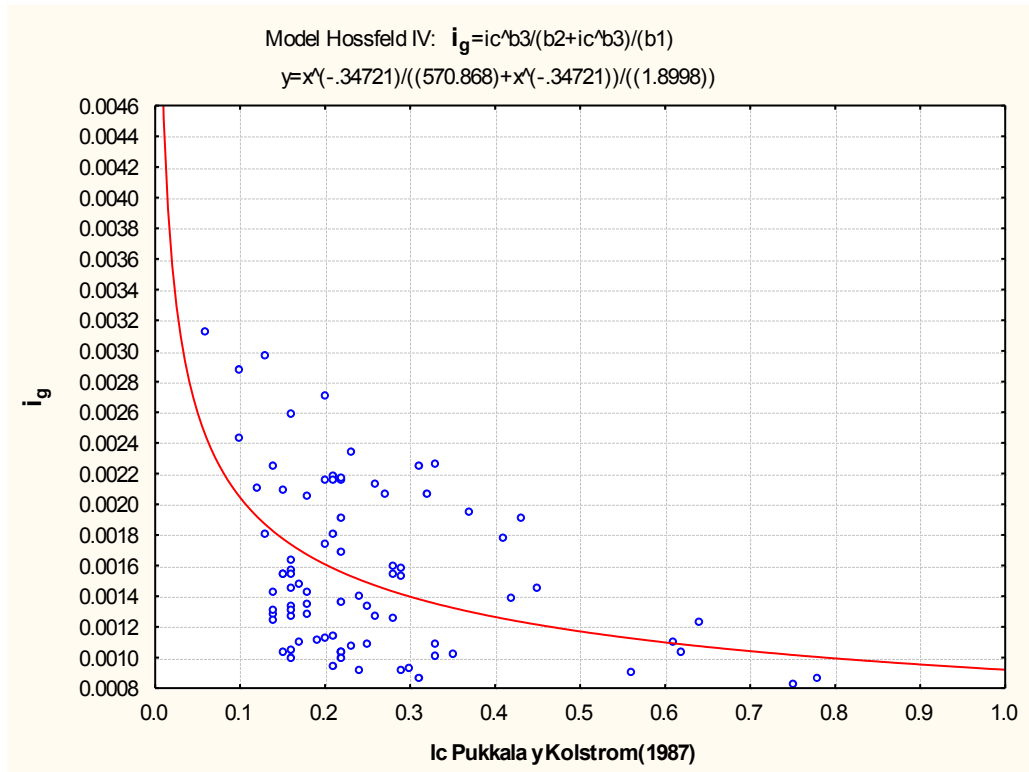


Figura 7. Ic de Pukkala y Kolstrom (1987) con el modelo de Hossfeld.

Los índices de competencia que se presentan en seguida utilizan como variable de inclusión el área de copa ( $m^2$ ), en la evaluación de la competencia.

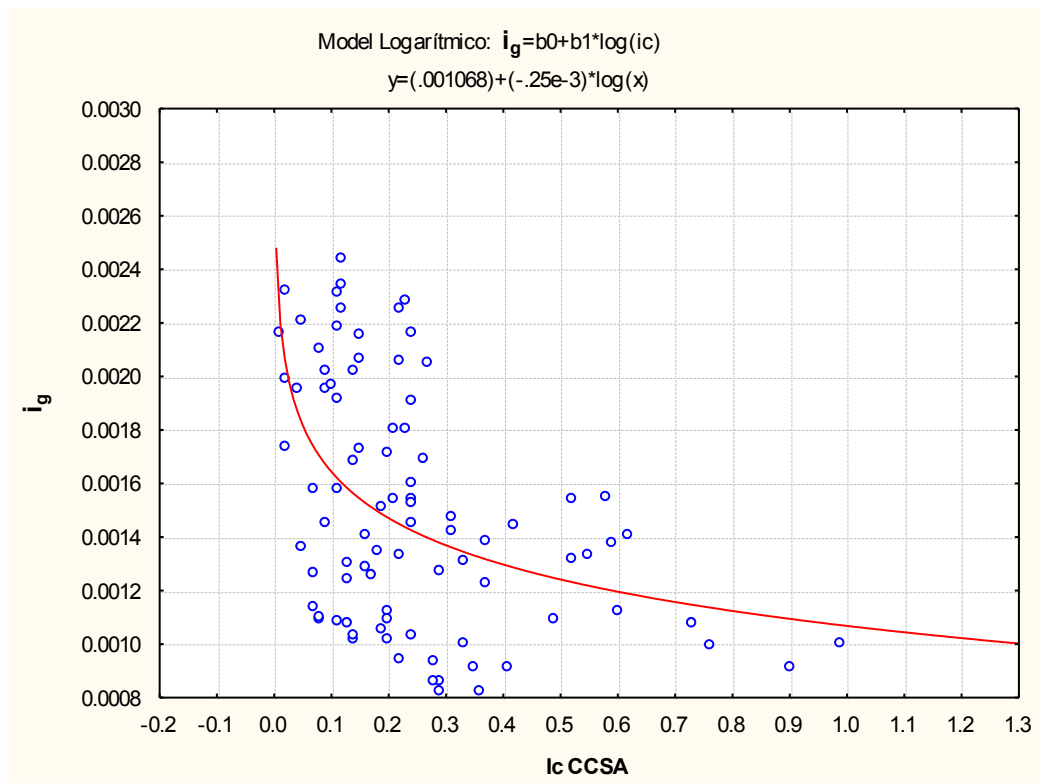
Para el índice de competencia Crown Cross-sectional area, se encontró que el modelo que presentó el mejor ajuste respecto a los estadísticos de evaluación fue el modelo logarítmico con un  $R^2$  de 0.2393, un CME de 0.000000159 y un valor de F de 415.7811, se observa que no hay mucha variación en los modelos ya que presentan similares CME y también los  $R^2$  son muy similares, por lo que cualquiera de estos modelos pueden predecir el incremento en área basal, ya que explican del 22 a 23% el incremento en área basal en función de la competencia (cuadro 5).

**Cuadro 5.** Estadísticos de ajuste para el  $i_g$  con el  $I_c$  CCSA.

<b>Estadísticos de ajuste para el <math>i_g</math></b>			
<b>IC Crown cross-sectional area</b>			
<b>Modelo</b>	<b>CME</b>	<b>R2</b>	<b>Valor F</b>
<b>Fresse</b>	0.000000161	0.2344	424.4658
<b>Logarítmico</b>	0.000000159	0.2293	415.7811
<b>Korf</b>	0.000000161	0.2343	424.4234
<b>Korsun</b>	0.000000161	0.2329	423.5588
<b>Hossfeld</b>	0.000000161	0.2194	639.4428

Lo anterior se corrobora al observar la varianza de los modelos, que presentan bajos valores en los CME y todos altamente significativos ( $p > F = 0.001$ ).

En las siguientes figuras se presentan los índices de competencia con los modelos de incremento en área basal, donde se aprecia que a menor competencia hay un mayor incremento en el área basal, en el otro extremo se observa que a mayor competencia este incremento decrece (fig. 8, 9, 10, 11 y 12).



**Figura 8.** Ic CCSA con el modelo logarítmico.

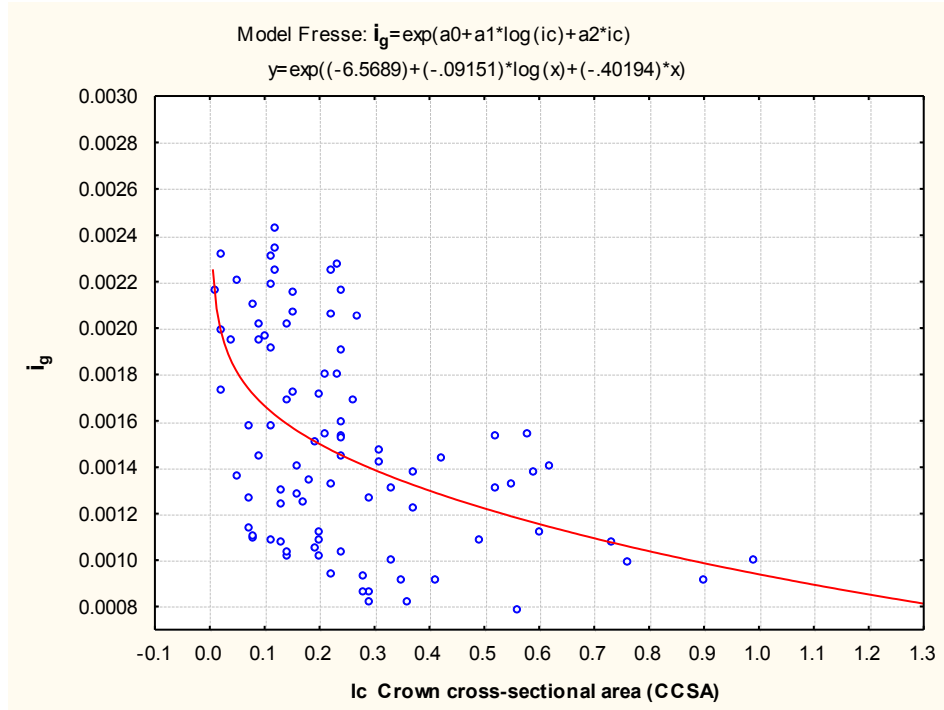


Figura 9. Ic CCSA con el modelo de Fresse.

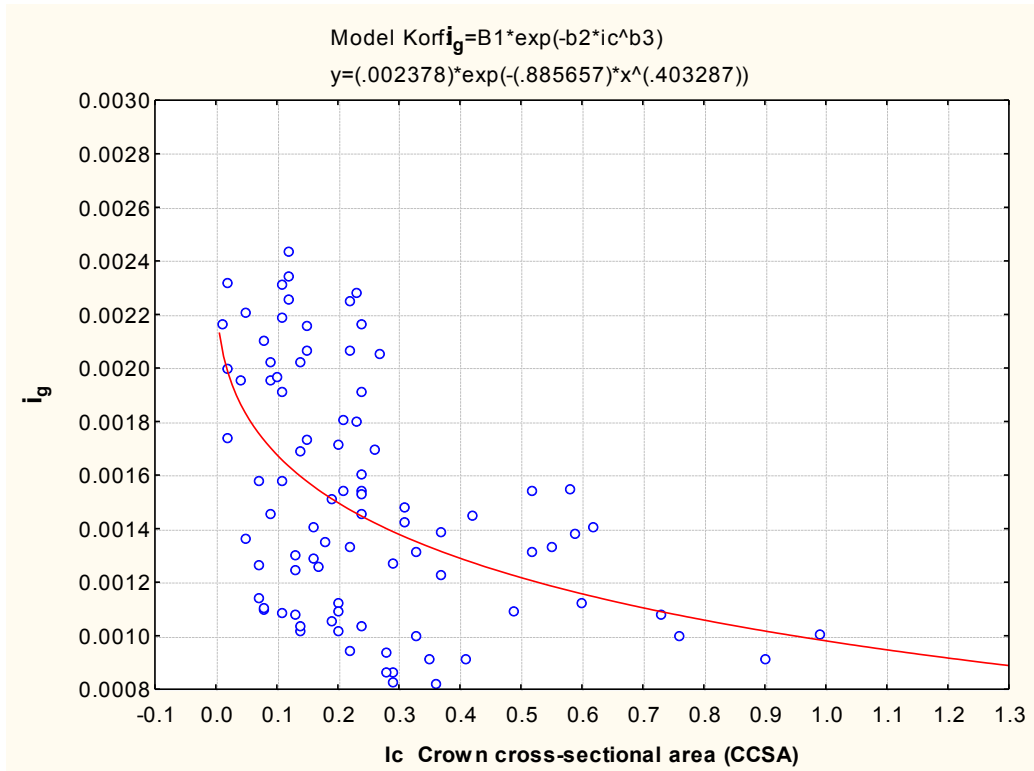


Figura 10. Ic CCSA con el modelo de Korf.

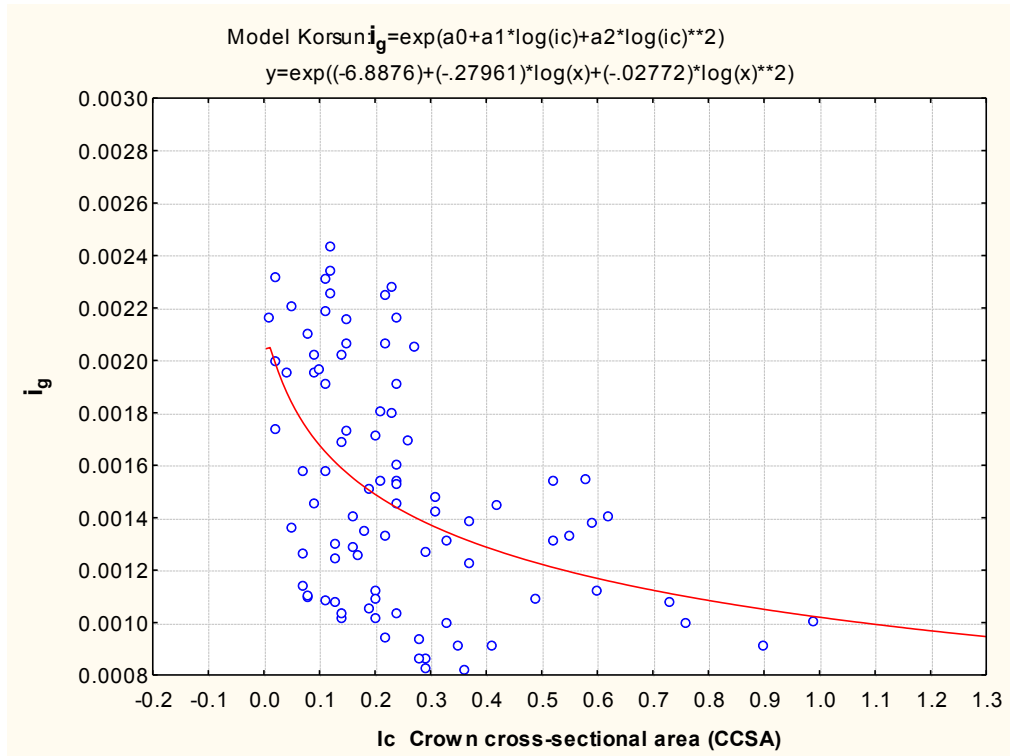


Figura 11. Ic CCSA con el modelo de Korsun.

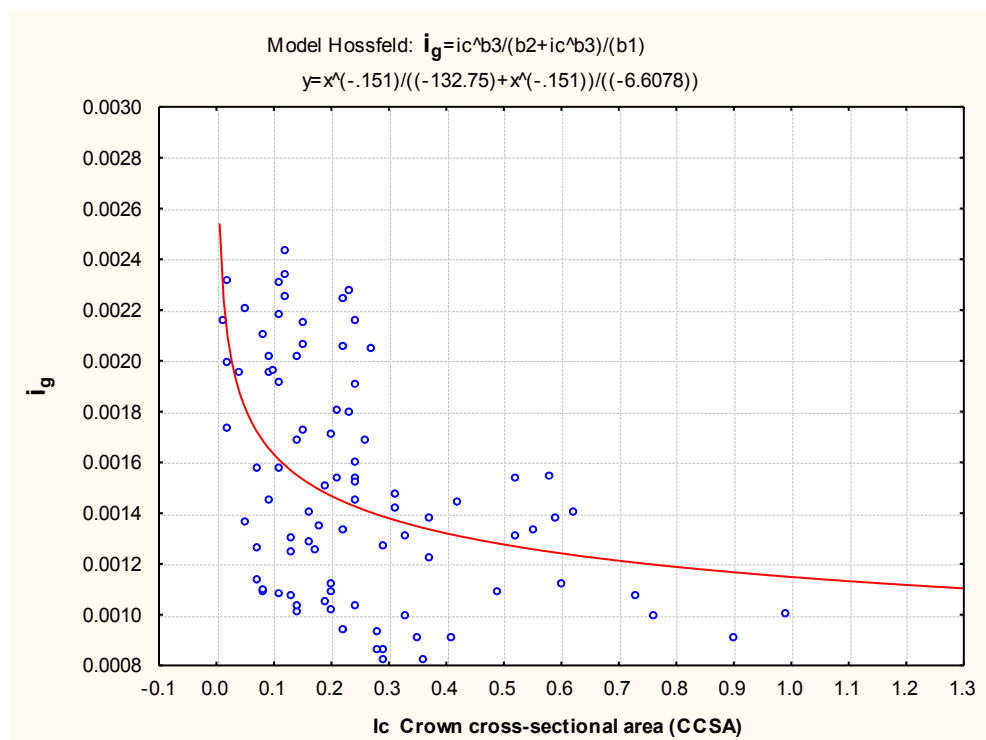


Figura 12. Ic CCSA con el modelo de Hossfeld

Para el índice de competencia de Biging y Dobbertin (1992), se encontró que el modelo que presentó el mejor ajuste en el incremento en área basal fue el logarítmico arrojando un  $R^2$  de 0.2438, un CME de 0.000000183 y un valor de F de 624.55. En el siguiente cuadro se presentan los estadísticos de ajuste, en la cual se observa una pequeña variación en los CME, mas no en los  $R^2$ , y se corrobora al observar al mismo tiempo la varianza de los modelos, que presentan los menores valores en los CME y altamente significativos ( $p > F = 0.001$ ), por lo cual cualquiera de los tres modelos pueden tomarse ya que muestran buena eficiencia para modelar el incremento en área basal, explicando el 24% del incremento en área basal en función de la competencia (cuadro 7).

**Cuadro 7.** Estadísticos de ajuste para el  $i_g$  con el  $I_c$  de Biging y Dobbertin (1992).

<b>Estadísticos de ajuste para el <math>i_g</math></b>			
<b>IC Biging y Dobbertin (1992)</b>			
<b>Modelo</b>	<b>CME</b>	<b>R2</b>	<b>Valor F</b>
<b>Fresse</b>	0.000000185	0.2440	412.1963
<b>Logarítmico</b>	0.000000183	0.2438	624.55
<b>Korf</b>	0.000000189	0.2437	305.7278

En las siguientes figuras se presentan los modelos de incremento en área basal con el índice de competencia ajustado. En dichas figuras se puede apreciar cómo inicialmente, cuando se tiene menos competencia, el peso del factor positivo es mucho mayor que el de las restricciones o factor negativo, por lo que el incremento se dispara, dando lugar a una curva de evaluación cóncava. A medida que aumenta la competencia las restricciones van aumentando, de tal manera que se llega a producir un cambio en la curvatura de la gráfica de evolución (se produce un punto de inflexión), que se corresponde con el valor mínimo de la curva incremento. A partir de ese momento, y puesto que siguen aumentando las restricciones, el incremento en área basal comienza a hacerse cada vez más lento, lo que significa que la curva de crecimiento disminuye paulatinamente. Esta tendencia continua hasta que finalmente los factores que favorecen y se oponen al crecimiento se igualan, por lo que cesa el crecimiento y se estabiliza la competencia, hecho que corresponde matemáticamente con la asíntota horizontal.

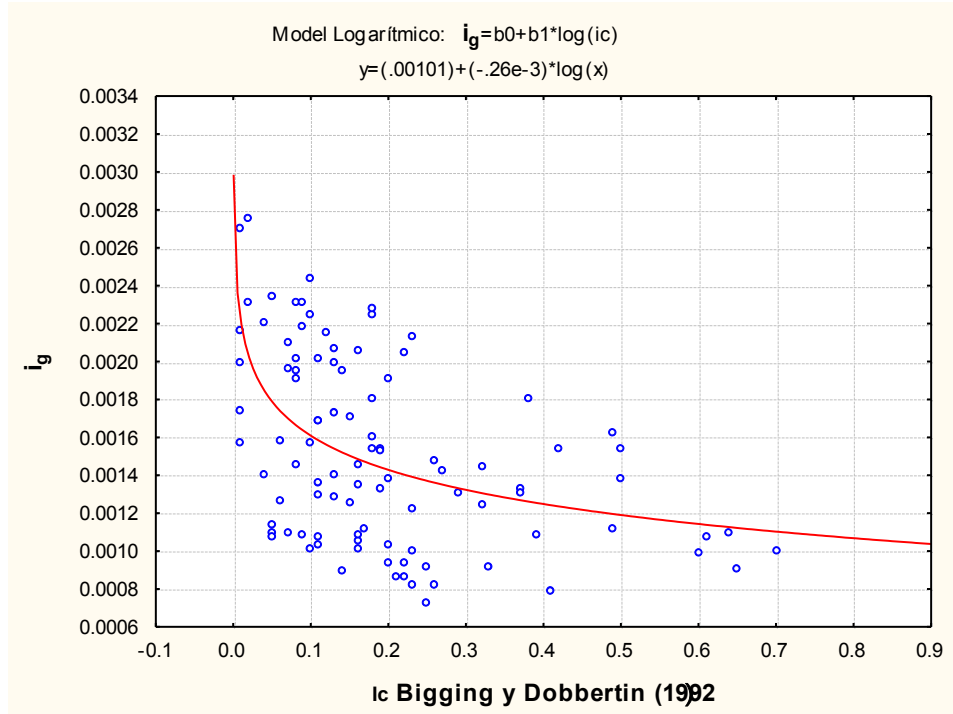


Figura 13. Ic de Bigging y Dobbertin (1992) con el modelo logarítmico.

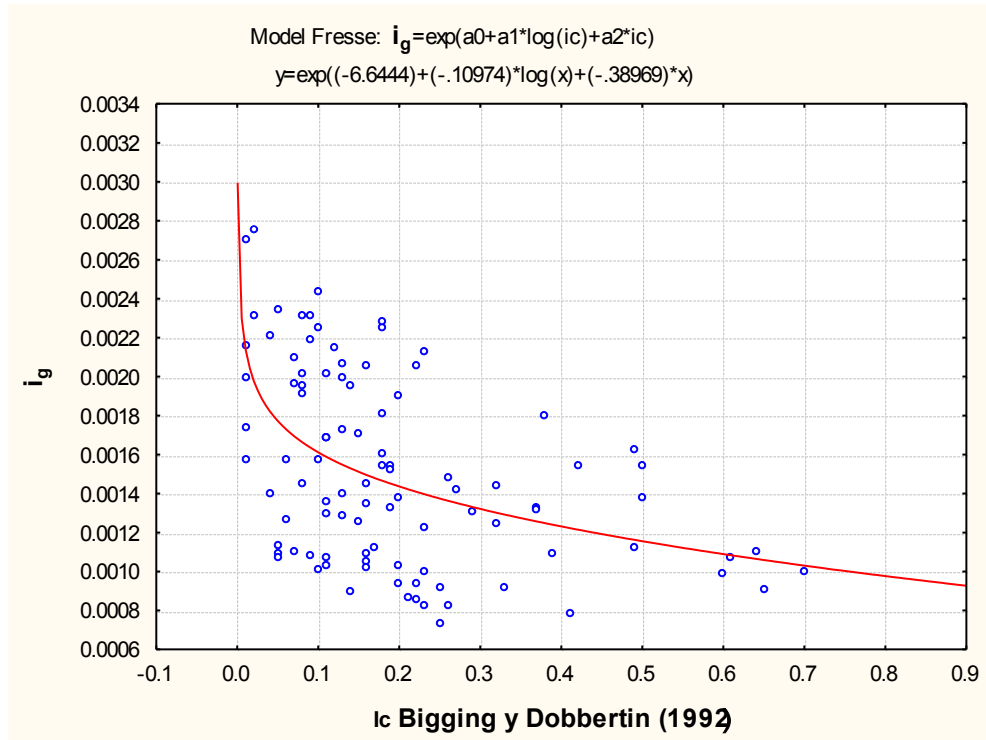
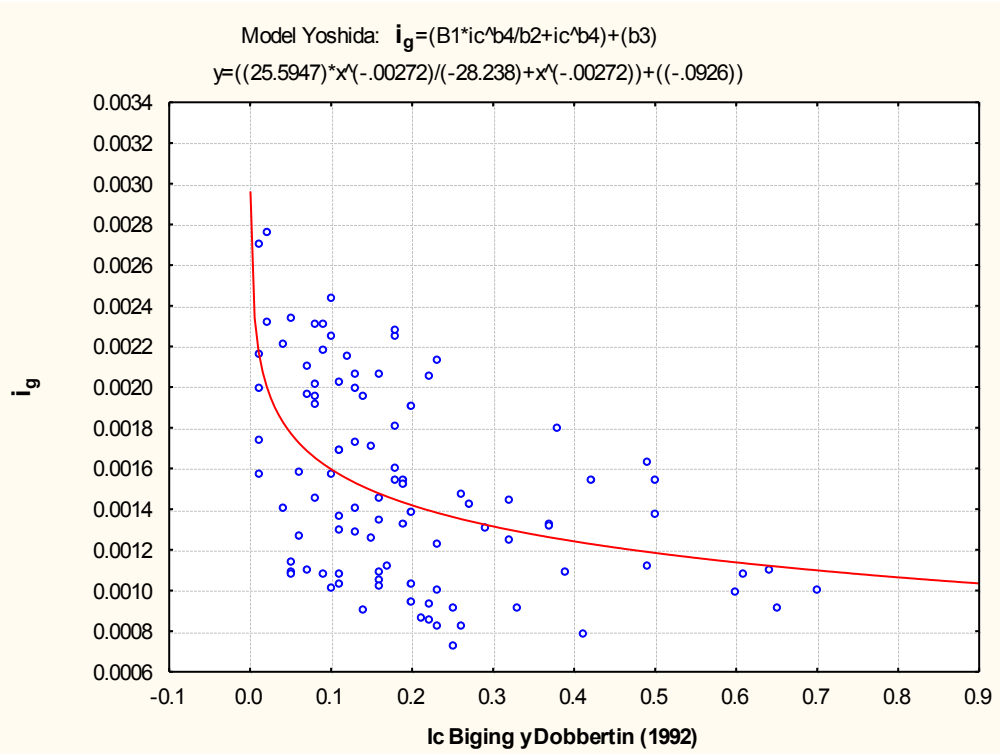


Figura 14. Ic de Bigging y Dobbertin (1992) con el modelo de Fresse.



**Figura 13.** Ic de Biging y Dobbertin (1992) con el modelo de Yoshida.

#### 4.5. Competencia entre especies

Respecto a las especies evaluadas, se encontró que cuando estas son de especies diferentes la competencia es mucho menor o nula, por ejemplo cuando el competidor es un encino con respecto al de referencia pino, la competencia es muy baja, también esto sucede cuando el competidor es un pino-pino pero de especie diferente, esto quizás se atribuye a que los requerimientos nutricionales son diferentes, y la disponibilidad de los recursos no cae por lo bajo de la suma de requerimientos de la especie, por lo tanto no afecta en el incremento en área basal de los individuos.

## 5. DISCUSIÓN

El índice de Hegyi (1974) evaluado con el criterio de 10 pies de distancia a partir del árbol de referencia, no demuestra eficiencia para modelar el incremento en área basal, esto se atribuye a que la mayoría de los árboles en las parcelas de muestreo se encuentran en distancias mayores de 10 pies (3.05 m) y muy pocos árboles cayeron dentro del radio de zona de competencia (CZR), por lo tanto no se tiene muchas muestras, esto originó bajos coeficientes de determinación con valores de 5% lo cual explican muy poco el incremento en área basal en función de la competencia.

Respecto al índice de Hegyi (1974) evaluado con el criterio de Lee y Gadow (1997), estos muestran altos valores en los CME y bajos  $R^2$  lo que ocasiona que los modelos no presenten un buen ajuste. Los valores altos en el CME es que no se reduce al mínimo la suma de errores ajustados debido a sesgo y a la variación.

Para el índice de competencia de Pukkala y Kolstrom (1987), presentan un mejor ajuste ya que muestran valores de 17 a 18% en los  $R^2$ , este incremento es debido a que la varianza de los modelos presentan menores valores en los CME.

Para el índice de competencia CCSA y el de Biging y Dobbertin (1992), se observó que la varianza de los modelos ya presentan menores valores en los CME, por lo que se incrementaron los coeficientes de determinación, además de ser altamente significativos ( $p < 0.001$ ); esto se debe a que estos índices de competencia son ponderados por el área de copa, por lo cual probablemente dicha reducción está asociada por esta variable. Esto concuerda con Biging y Dobbertin (1995), que mencionan que los parámetros de copa son más eficientes para estimar la competencia.

En las figuras presentadas se observa que a medida que aumenta la competencia el incremento en el área basal disminuye, esto se debe a que la disponibilidad de los recursos se hace cada vez más limitados aumentando la demanda de estos. Esto concuerda con Brand y Magnussen (1988), quienes mencionan que la competencia entre los árboles dentro de una población existe cuando la disponibilidad de recursos cae por debajo de la suma de los requerimientos de la población para el crecimiento óptimo.

Respecto a las especies evaluadas, se encontró que cuando son especies diferentes la competencia es mucho menor, esto debido a sus requerimientos nutricionales son diferentes y concuerda con Harold y Hocker (1984), quienes mencionan que si dos plantas de especies diferentes ocupan posiciones adyacentes en una localidad pueden competir por la luz y la humedad, pero como sus requerimientos minerales son ligeramente diferentes, pueden

complementar su abastecimiento de minerales y otras necesidades, presentando poca o ninguna competencia, ya que sus requerimientos de nicho evolucionan de diferente forma. Por lo tanto la competencia se presenta entre los individuos de la misma especie (intraespecie) o entre distintos individuos (interespecie).

## 6. CONCLUSIONES

La evaluación de los índices de competencia dependientes de la distancia a través de modelos de crecimiento es importante para modelar la dinámica de los bosques.

Los índices de competencia muestran de manera indirecta la competencia por los recursos limitados como luz, agua y nutrientes, ya que tales recursos tienen una relación directa en el crecimiento y rendimiento de las especies forestales.

Con respecto a los índices de competencia evaluados que ocupan el área superficial de copa, muestran que el área de copa influye más en el incremento basal, debido a que la luz es un recurso limitado para los árboles dentro de un bosque, donde se tiene diferente estructura vertical. Según Spurr y Barnes (1982), la importancia más obvia de la radiación solar en los árboles forestales descansa en la dependencia de la vida sobre la fotosíntesis y la dependencia que a su vez tiene la fotosíntesis de la luz.

Mediante este proceso, se puede conocer el grado de exactitud de cada índice de competencia incluido en un modelo matemático que permita estimar el crecimiento y rendimiento de los bosques naturales, ya que son buenos predictores para modelar el crecimiento de árboles individuales. Según Prodan

*et al.*, (1997), la tendencia hoy en día no es ajustar funciones de rendimiento sino funciones de crecimiento y luego integrarlas para obtener estimaciones de rendimiento.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

**Álvarez, T. M. F. 1998.** Influencia de la competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D.Don. Proyecto fin de carrera. Universidad de Santiago de Compostela. Lugo, España.

**Álvarez, T. M. F., M. Barrio A., J. Gorgoso V. y J. G. Álvarez G. 2003.** Influencia de la Competencia en el crecimiento en sección en *Pinus radiata* D. Don. Lugo, España. Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.12 (2) 25-35.

**Andenmatten, E. y F. Letourneau. 2002.** Predicción y proyección del rendimiento de *Pino ponderosa* en las provincias de Chubut y Río Negro, Argentina. Campo Forestal Gral. San Martín, Estación Experimental Bariloche, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. El Bolsón, Río Negro, Argentina. Ciencias Forestales –Quebracho N° 10.

**Biging, G. S., Dobbertin, M. 1992.** A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees. For. Sci. 38:695-720.

**Biging, G. S. And M. Dobbertin. 1995.** Evaluation of competition indices in individual tree growth models. For Sci. 4(2): 360-377.

**Brand, D.C. y Magnussen S.1988.** Asymmetric two-sided competition in even-aged monocultures of red pine. Can. J. For. Res. 18:901-910.

**Clutter, J.L., Fortson, J.C., Peinar, L.V., Brister, G.H., and Bailey, R.L. 1983.** Timber management: A quantitative approach. John Wiley and Sons. New York. pp:3-29.

- Daniel, T. W., Helms J.H. y Baker F.S.1982.** Principios de Silvicultura. Ed. McGraw-Hill. México. 493 p.
- Davis L. S., Johnson, K. N., Bettinger, P. S., Howar, T. E. 2001.** Forest management. To sustain ecological, economic and social values. Mc. Graw Hill. Boston. 804 p.
- Docando V. E., A. D. Ruíz G. y M. Barrio A. 2003.** Crecimiento en volumen de árbol individual de *Quercus robur* L. en el norte de la provincia de Lugo. Universidad de Santiago de Compostela. España.
- Gadow, K. V. y Hui, G. Y. 1999.** Modelling forest development. Kluwer Academic Publishers. Dodrecht. 213 p.
- Gadow, K. V., S. Sánchez O. y O. A. Aguirre C. 2004.** Manejo forestal con bases científicas. Madera y Bosques. 10(2): 3-16.
- García, O. 2003.** El enfoque del espacio de estados en modelos de crecimiento. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 21 pp.
- Harold W. y Hocker Jr. 1984.** Introducción a la biología forestal. 1ra edición en español. A.G.T. Editor, S.A.
- Hegyí, F. 1974.** A simulation model for managing jack-pine stands. In: Growth models for tree and stand simulation. Fries, J. (ed). Royal Coll. of For., Sockholm, Sweden. Pp. 74-90.
- Holmes, M.J. y Reed, D.D. 1991.** Competition indices for mixed species in Northern Hardwoods. Forest Science. 37(5): 1338-1349.

**INEGI. 1984.** Carta topográfica. Escala 1:50,000. El Salto, Durango. F13-A18 spp. Mexico.

**Jardel, P. E. y L.R. Sánchez V. 1989.** La sucesión forestal: fundamento ecológico de la silvicultura. Ciencia y Desarrollo. 14(84):33-43.

**Jerez, R. M., V. Lawrence y A. Moret Y. 1999.** Un modelo de competencia para las plantaciones de teca del área experimental de la reserva forestal Cáparo (Barinas-Venezuela). Universidad de Los Andes. Forestal Venezolana. 43 (2) 157-171.

**Klepac, D. 1976.** Crecimiento e incremento de árboles y masas forestales. Departamento de enseñanza , investigación y servicio en bosques. Universidad Autónoma Chapingo. México. 365 pp.

**Lee, W. K, Gadow, K. V. 1997.** Iterative Bestimmung der Konkurrenzbaume in Pinus densiflora Beständen. Allgemeine Forst-und Jagdzeitung 168 (3/4): 41-44.

**Martin, G.L. y Ek, A.L. 1984.** A comparisson of competition measures and growth models for predicting plantation Red Pine diameter and height growth. For. Sco. 30 (3): 731-743.

**Martínez, M. 1992.** Los pinos mexicanos. 3 edición, Ediciones Botas. Pp 97-100.

**Odum P.E. 1972.** Ecología. 3ª Edición. Interamericana. Traducción México.

**Oliver, C. D., C. Larson B. 1990.** Forest stand dynamics. McGraw Hill. New York. 467 p.

- Pukkala, T. 1989.** Prediction of tree diameter and height in a Scots pine stand as a function of the spatial pattern of trees. *Silva Fenn.* 23:83-99.
- Pretzch, H. 2001.** Modellierung des waldwachstums. Parey Buchverlag Berlin. 341 p.
- Prodan, M., R. Peters., F. Cox y P. Real. 1997.** Mensura Forestal. Serie de investigación y educación en desarrollo sostenible. San José, Costa Rica. 561 p.
- Reporte de la Auditoria Anual. 2004.** Certificación SmartWood del Ejido La Victoria; SW-FM/COC-154.
- Sanquetta, C. R., J. E. Arce., F. dos Santos G. y E. Coutinho da C. 1997.** Evaluación y simulación precoces del crecimiento de rodales de *Pinus taeda* L. Con matrices de transición. *Quebracho* N° 7 (31-42).
- Spurr S. H. y Barnes B. V.1982.** Ecología forestal. 3ra Edición. Edit. A.G.T. 686 p.
- Tome, M. and H. E. Burkhart. 1989.** Distance dependent competition measures for predicting growth of individual trees. *For. Sci.* 35:816-831.
- Torres-Rojo J. M. 2000.** El área de ocupación promedio: Una medida de competencia independiente de la distancia. *Agrociencia* 34: 485-495.
- Valles, G. A. G., J. M. Torres-Rojo., A. Velásquez M. y C. Rodríguez F. 1998.** Relación de nueve índices de competencia con el crecimiento en diámetro de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 32(3):255-260.

**Valles, G. A. G. e Islas G. F. 2000.** Sistemas de ecuaciones del simulador del crecimiento maderable para la región de San Dimas, Durango. "Sicremars versión 1.0". Inifap. México. 55 pp.

**Valles, G. A. G., R. F. González, L., A. Gallegos, I., J. J. Navar, C. y J. M. Torres-Rojo. 2002.** Evaluación de índices de biocompetencia a través de un modelo biopredictivo en bosques naturales en durango. en simposio nacional sobre biotecnología. itd – durango.

**Valles, G. A. G., R. F. González, L., A. Gallegos, I., J. M. Torres-Rojo., J. J. Navar, C. y M. Rocha F. 2003.** Evaluación de modelos matemáticos para la predicción uniforme del crecimiento en *Pinus cooperi* Blanco. VI Congreso mexicano de recursos forestales, "Nuevas tecnologías para el manejo forestal". Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía.

**Valadez, C. R. C. 2004.** Evaluación de índices de competencia independientes de la distancia para predecir el crecimiento de especies mezcladas en San Dimas, Durango. Tesis Profesional. Universidad Juárez del Estado de Durango. Escuela de Ciencias Forestales. Durango, México. 63 pp.

**Vancly, K.V. 1994.** Modeling forest growth and Yield: Applications to mixed tropical forests. CAB. International. Wallingford, Oxon, UK. 312 p.

**Vázquez J., Lago J. y A. González. 2003.** INCO: Programa para el cálculo de índices de competencia de especies forestales. Departamento de Ciencias Agroforestales. Universidad de Huelva. España.

**Waring, R. H., Running, S. W. 1998.** Forest ecosystems. Analysis at multiple scales. Academic press. San Diego. 370 p.