



MODELOS DE PREDICCIÓN DEL INCREMENTO EN VOLUMEN PARA BOSQUES MEZCLADOS DEL ESTADO DE DURANGO, MÉXICO

MODELS TO PREDICT THE VOLUME INCREMENT FOR MIXED FORESTS IN DURANGO, MEXICO

José Luis Reyes-Muñoz^{1*}, Oscar Alberto Aguirre-Calderón¹, Javier Jiménez-Pérez¹, Eduardo Javier Treviño-Garza¹, Enrique Jurado¹, Rubén Francisco González-Laredo².

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma de Nuevo León. Carretera Nacional, km 145, C.P. 67700, A.P. 41, Linares, Nuevo León, MÉXICO. Correo-e: jlreyes@profepa.gob.mx

² Profesor-Investigador. Instituto Tecnológico de Durango, Departamento de Ingenierías Química y Bioquímica. Felipe Pescador 1830 Ote., C.P. 34080, Durango, MÉXICO.

RESUMEN

Se evaluaron 30 modelos para predecir el incremento maderable en 28 Sitios Permanentes de Investigación Silvícola (SPIS), ubicados en el Ejido Pueblo Nuevo del estado de Durango, México. La asociación vegetal predominante es la correspondiente a rodales mezclados de *Pinus* y *Pinus-Quercus*, además de la vegetación asociada a estos bosques. Los modelos en forma logarítmica incorporan 10 índices de competencia (*IC*) independientes de la distancia, tres índices de densidad (*ID*), además de las variables edad (*t*) y altura promedio del rodal (*H*). Los nuevos modelos matemáticos relacionan de una manera indirecta el efecto de la competencia y la densidad en el crecimiento de los árboles presentes en el rodal.

De acuerdo con los análisis de varianza y las pruebas de hipótesis realizadas, se encontró que los mejores *IC* incorporados en un modelo matemático para la modelización del incremento en volumen, fueron el índice de competencia de área basal densidad (*IGN*), índice de competencia de diámetro cuadrático densidad (*IDCN*), índice de competencia de área basal total densidad (*IGTN*) y el índice de competencia de altura total máxima (*IHMAX*). Los mejores modelos presentan un alto nivel de exactitud con $Prob > |t| = 0.0001$ y valores promedio de 0.99 en R^2 .

Recibido: 12 de mayo, 2010
Aceptado: 14 de agosto, 2010
doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.05.026
http://www.chapingo.mx/revistas

PALABRAS CLAVE: Crecimiento volumétrico, índice de competencia, índice de densidad, índice independiente de la distancia, rodal.

ABSTRACT

Thirty models were evaluated to predict timber volume growth and yield in 28 Permanent Plots (SPIS), in the Ejido Pueblo Nuevo, Durango, Mexico. The predominant plant association is mixed stands of *Pinus* and *Pinus Quercus*, along with the vegetation associated with these forests. The models in logarithmic form incorporate 10 competition indices (*IC*) independent of distance, 3 density indices (*ID*), age (*t*) and canopy height (*H*) at the average level of the stand. The mathematical models indirectly relate the effect of competition and density on tree growth and yield. According to the variance analyses and the test hypothesis, the best *IC* incorporated in a mathematical model for the volume increment prediction was the basal area density competition index (*IABN*), the diameter quadratic density competition index (*IDCN*), the basal area total density competition index (*IABTN*) and the maximum total height competition index (*IHMAX*). The best models presented average values of $R^2 = 0.99$ and a highly significant level of accuracy ($Pr > |t| = 0.0001$).

KEY WORDS: volume growth, competition index, density index, distance independent index, stand.

INTRODUCCIÓN

La relación existente entre los factores que regulan el crecimiento no es ampliamente conocida, aunque se acepta que el crecimiento de un árbol está determinado por 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). Por tal motivo, entender la

INTRODUCTION

The relationship that exists between the factors that regulate tree growth is not widely known, although it accepted that growth is determined by the variety of the species present, their age, site quality, number of individuals per area unit and the competition existing for the availability of resources (Curtis, 1970). Therefore, understanding the competition-density relationship contributes to a better

relación competencia-densidad, contribuye a un mejor conocimiento sobre la dinámica de crecimiento de las masas forestales; lo cual puede apoyar la prescripción de regímenes silvícolas que permitan manejar los bosques naturales de una manera más efectiva.

Los Programas de Manejo Forestal (PMF) que sirven de base para el aprovechamiento forestal maderable en el estado de Durango y en general para México, se elaboran con base en un inventario a partir del cual se extrapola la información al resto de la superficie de manejo forestal (rodal o subrodal); posteriormente, se determinan los volúmenes de cosecha con base en los modelos de incremento y rendimiento para preestablecen las intensidades de corta a ejercer.

Índices de competencia (IC)

Los IC son una medida del efecto que producen los árboles vecinos en el crecimiento de un individuo dentro de un rodal (Vanclay, 1991). Dentro de la amplia variedad de clasificaciones existentes para árboles individuales, varios autores coinciden al señalar dos clases de modelos para IC: los dependientes de la distancia e independientes de la distancia (Munro, 1974; Peng, 2000). En los modelos independientes de la distancia cada árbol es modelado separadamente y su posición competitiva se determina comparando el diámetro individual, altura y condición con las características del rodal. Mientras que en los modelos dependientes de la distancia, además de la altura, diámetro y otras variables del árbol usadas en los modelos independientes de la distancia, cada árbol individual es literalmente mapeado para determinar la distancia y el tamaño de los árboles adyacentes que están compitiendo con el árbol sujeto de estudio por la disponibilidad de recursos.

En la literatura se reporta una amplia variedad de índices de competencia dependientes de la distancia, desde los que consideran la superposición de zonas de influencia (Staebler, 1951; Gerrard, 1969; Bella, 1971; Arney, 1973; Ek y Monserud, 1974), hasta los índices basados en las dimensiones de los árboles vecinos ponderados por la distancia (Hegyi, 1974; Martin y Ek, 1984; Daniels, 1976; Biging y Dobbertin, 1992). Los índices independientes de la distancia son fáciles de calcular y demandan menor cantidad de información, lo cual representa una ventaja en algunos casos con respecto a los dependientes de distancia (Tomé y Burkhart, 1989). Glover y Hool (1979) desarrollaron un índice de competencia independiente de la distancia que considera simplemente las dimensiones del arbolado; tomando como base éste índice, se han desarrollado algunas ecuaciones que lo consideran en modelos que simulan el crecimiento en altura o en diámetro para una especie en particular (Valles *et al.*, 1998; 2003).

Algunos autores coinciden al señalar que los índices dependientes de la distancia son los más eficientes

knowledge of the growth dynamic of forest masses, which can support the prescription of forest regimes that allow a more effective management of natural forests.

The Forest Management Programs (FMP) that serve as a base for the timber use in the state of Durango and for Mexico in general, are made based on an inventory from which the information is extrapolated to the rest of the forest management surface (stand or sub-stand); later, the harvest volumes are determined based on the models of increment and yield for pre-establishing the cutting intensities to be carried out.

Competition indices (CI)

The CI are a measurement of the effect produced by the neighboring trees on the growth of an individual within a stand (Vanclay, 1991). Within the wide variety of existing classifications for individual trees, various authors coincide in indicating two classes of models for CI: those that depend on distance and those that are independent of distance (Munro, 1974; Peng, 2000). In the models independent of distance, each tree is modeled separately and its competitive position is determined by comparing the individual diameter, height and condition with the characteristics of the stand. While in the distance- dependent models as well as height, diameter and other variables of the tree used in the distance-independent models, each individual tree is literally mapped to determine the distance and size of the adjacent trees that are competing with the tree under study for the availability of resources.

In the literature a wide variety of distance-dependent competition indices is reported, from those that consider the superposition of influence zones (Staebler, 1951; Gerrard, 1969; Bella, 1971; Arney, 1973; Ek and Monserud, 1974), to the indices based on the dimensions of the neighboring trees weighted by the distance (Hegyi, 1974; Martin and Ek, 1984; Daniels, 1976; Biging and Dobbertin, 1992). The distance-independent indices are easy to calculate and demand a smaller amount of information, which represents an advantage in some cases with respect to the distance-dependent indices (Tomé and Burkhart, 1989). Glover and Hool (1979) developed a distance- independent competition index that simply considers the dimensions of the stand; taking this index as a base, some equations have been developed which consider it in models that simulate height or diameter growth for a particular species (Valles *et al.*, 1998; 2003).

Some authors coincide in pointing out that the distance-dependent indices are the most efficient for predicting growth in even-aged forests. However, the importance of the distance-independent indices is that the natural forests in Mexico present a great variety of structures and species, with measurements of inter-arboreal competition that can be the base for the generation of new growth prediction models (Torres-Rojo, 2000).

para predecir el crecimiento en bosques coetáneos; sin embargo, la importancia de los índices independientes de la distancia radica en que los bosques naturales en México presentan una gran variedad de estructuras y especies, con medidas de competencia interarbórea que pueden ser la base para la generación de nuevos modelos de predicción del crecimiento (Torres-Rojo, 2000).

Índices de densidad (ID)

La densidad es una medida del grado de ocupación de un terreno forestal en particular, es un indicador del grado de aglutinamiento del arbolado presente, definido por el número de árboles y sus dimensiones; puede ser medida por el número de árboles por unidad de superficie (área basal por hectárea, volumen por hectárea, cobertura de copas, grado de espesura y mediante diversos índices de densidad de rodal) (Cano, 1998; Zepeda y Villarreal, 1987; Davis y Johnson, 1987; Zeide, 2005; Spurr, 1962).

Una de las razones para considerar la densidad de un rodal, es que constituye una variable importante para predecir la forma, crecimiento y sobrevivencia de los árboles; medida importante para incrementar la productividad forestal mediante el control de la competencia interarbórea.

El principal objetivo de este trabajo fue desarrollar modelos matemáticos que permitan explicar dentro de límites aceptables el crecimiento al nivel del rodal, a fin de poder determinar el volumen de cosecha que se puede obtener sin poner en riesgo la permanencia y productividad del recurso forestal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en el Ejido Pueblo Nuevo del estado de Durango, México, entre las coordenadas geográficas 23.60° y 23.41° de latitud norte, 105.38° y 105.40° de longitud oeste (Figura 1), en el macizo montañoso denominado Sierra Madre Occidental. Fisiográficamente se ubica en la subprovincia Gran Meseta y Cañones Duranguenses; la altura sobre el nivel del mar presenta un promedio de 2,130 m, con un sistema de relieve predominantemente accidentado y pocas superficies de terreno ondulado o plano. Según la clasificación climática de Köeppen adaptada para México por García (1973), los climas predominantes en la región son del tipo C(W2) y C(E) (W2), que corresponden respectivamente al templado subhúmedo y semifrío subhúmedo, con lluvias en verano, con precipitación del mes más seco menor de 40 mm y con un porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 mm, temperaturas mínimas y máximas que pueden ser desde -18 hasta 32 °C. Las comunidades vegetales más

Density indices (DI)

Density is a measurement of the degree of occupation in a particular forest terrain; it is an indicator of the degree of agglutination of the treed surface present, defined as the number of trees per surface unit (basal area per hectare, volume per hectare, crown cover, degree of thickness and by means of diverse stand density indices) (Cano, 1998; Zepeda and Villarreal, 1987; Davis and Johnson, 1987; Zeide, 2005; Spurr, 1962).

One of the reasons to consider stand density is that it constitutes an important variable for predicting the form, growth and survival of the trees, an important measure for increasing forest productivity through the control of inter-arboreal competition.

The principal objective of the present study was to develop mathematical models that make it possible to explain within acceptable limits the growth at the stand level, in order to determine the volume of harvest that can be obtained without risking the permanence and productivity of the forest resource.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The study area is located in the Ejido Pueblo Nuevo of the state of Durango, Mexico, between 23.60° and 23.41° latitude north, 105.38° and 105.40° longitude west (Figure 1), in the mountain range known as Sierra Madre Occidental. Physiographically it is located in the sub-province Gran Meseta y Cañones Duranguenses; the altitude above sea level presents an average of 2,130 m, with a predominantly rugged relief system and few surfaces of hilly or level terrain. According to the climatic classification of Köeppen adapted for Mexico by García (1973), the predominant climates in the region are of the type C(W2) and C(E) (W2), which correspond respectively to the temperate sub-humid and semi-cold sub-humid, with rains in summer, and with precipitation in the driest month of less than 40 mm and with a percentage of winter rain between 5 and 10.2 mm, minimum and maximum temperatures that can range from -18 to 32 °C. The most important plant communities of the area are comprised of mixed forests with species of the genus *Pinus* and *Quercus*, along with some shrub species. The timber species that are important for forest use are principally: *Pinus herrerae*, *Pinus durangensis*, *Pinus douglasiana*, *Pinus lumholtzii*, *Pinus michoacana*, *Pinus leiophylla*, *Pinus oocarpa*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus maximinoi*, *Pinus teocote*, *Pinus cooperi*, *Pinus engelmannii*, *Quercus* spp., *Juniperus* spp., *Arbutus* spp., and *Alnus* spp. (Meraz, 2008).

Data base

In 2001 29 Permanent Forest Investigation Sites (PFIS) were established measuring 50 × 50 m along with a

importantes del predio están compuestas por bosques mezclados con especies del género *Pinus* y *Quercus*, además de algunas especies arbustivas. Las especies maderables que destacan para el aprovechamiento forestal son: *Pinus herrerae*, *Pinus durangensis*, *Pinus douglasiana*, *Pinus lumholtzii*, *Pinus michoacana*, *Pinus leiophylla*, *Pinus oocarpa*, *Pinus ayacahuite*, *Pinus maximinoi*, *Pinus teocote*, *Pinus cooperi*, *Pinus engelmannii*, *Quercus* spp., *Juniperus* spp., *Arbutus* spp., y *Alnus* spp., principalmente (Meraz, 2008).

Base de datos

En el año 2001 se establecieron 29 Sitios Permanentes de Investigación Silvícola (SPIS) de 50 x 50 m y una parcela útil de 30 x 30 m (dividida en cuatro cuadrantes de 15 x 15 m), cada sitio tiene una franja de protección de 10 m en su perímetro. Los sitios se establecieron en la mayoría de los casos en bosques jóvenes de segundo crecimiento, con edades que oscilan entre 11 y 21 años, preferentemente en rodales en los que se aplicó preaclareo, primero y segundo aclareo; sin embargo, también se encuentran sitios establecidos en rodales con edades mayores a 48 años en los que se presenta el tratamiento silvícola de tercer aclareo. De los 29 sitios establecidos originalmente, se concluyó que 28 se encontraban en buen estado para realizar la remediación correspondiente al año 2007, la cual permitió la obtención del incremento por cada sitio (*S*) y cuadrante (*C*) en diámetro normal (*D*), altura total (*h*), número de árboles (*N*), grosor de corteza (*GC*), vitalidad (*V*), sanidad (*SAN*), forma (*F*), posición (*P*), proyección de copa (*PC*), edad (*t*) y estado de desarrollo de cada árbol con respecto a la primera medición del año 2001.

Modelos matemáticos

Con los datos obtenidos en campo, en una primera fase los cálculos básicos por cada sitio y cuadrante se efectuaron mediante una hoja de cálculo de Microsoft Office Excel®, mientras que en el análisis estadístico se realizó mediante regresión lineal múltiple utilizando el paquete estadístico SAS 9.1® (Statistical Analysis System, 2009). Con los datos de la medición del año 2001, se consideraron sólo las variables *D*, *h* y *t* para determinar el área basimétrica, volumen y edad para cada árbol; posteriormente, se obtuvieron los promedios a nivel cuadrante que generaron los índices de densidad *N* (número de árboles por hectárea), *G1* (área basimétrica por hectárea del año 2001), *V1* (volumen por hectárea del año 2001), que permitieron estimar cada uno de los índices de competencia que se señalan en el Cuadro 1, mismos que fueron desarrollados a partir del índice de Glover y Hool (1979). La base de datos de la remediación del año 2007, se empleó para calcular el incremento en volumen de los mismos árboles presentes en los SPIS en el año 2001.

Se evaluaron 30 modelos matemáticos en su forma logarítmica, en los cuales aparecen como constantes las

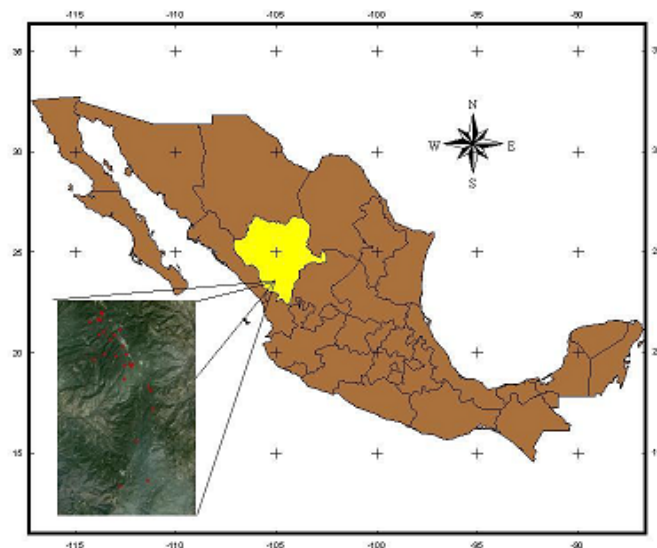


FIGURA 1. Ubicación del área de estudio.

Figure 1. Location of the study area.

useful plot of 30 × 30 m (divided into four quadrants of 15 × 15 m), each site having a protection strip of 10 m in its perimeter. The sites were established in most of the cases in young forests of second growth, with ages that fluctuate between 11 and 21 years, preferably in stands in which pre-thinning was established, first and second thinning. However, sites are also found established in stands with ages of more than 48 years in which the third thinning has been applied. Of the 29 sites originally established, it was concluded that 28 were found in a good state to carry out the remediation corresponding to 2007, which permitted the obtainment of the increment for each site (*S*) and quadrant (*Q*) in normal diameter (*D*), total height (*h*), number of trees (*N*), bark thickness (*BT*) vitality (*V*), health (*SAN*), form (*F*), position (*P*), crown projection (*CP*), age (*t*) and development stage of each tree with respect to the first measurement of 2001.

Mathematical models

Based on the data obtained in the field, in a first phase the basic calculations for each site and quadrant were made with a calculation sheet of Microsoft Office Excel®, while in the statistical analysis it was carried out by means of multiple linear regression using the statistical package SAS 9.1® (Statistical Analysis System, 2009). With the data of the measurement of 2001, only the variables *D*, *h* and *t* were considered for determining the basimetric area, volume and age for each tree. Then, the averages at the quadrant level were obtained that generated the density indices *N* (number of trees per hectare), *G1* (basimetric area per hectare of 2001), *V1* (volume per hectare of 2001), which made it possible to estimate each one of the competition indices indicated in Table 1, developed from the index of Glover and Hool (1979). The data base of the 2007 remediation was used to calculate the volume increment of the same trees present in the PFIS in 2001. Thirty

CUADRO 1. Descripción de los Índices de Competencia independientes de la distancia evaluados.
TABLE 1. Description of the distance-independent competition indices evaluated.

Nombre	Expresión matemática
1. Índice de competencia de área basal de Glover and Hool (1979)	$IGi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n \left(\pi \left((Dj / 2)^2 \right) \right) / n \right]}{\pi (Di / 2)^2}$
2. Índice de competencia de área basal densidad	$IGNi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n \left(\pi \left((Dj / 2)^2 \right) \right) / n \right]}{\pi (Di / 2)^2} (N)$
3. Índice de competencia de diámetro cuadrático	$IDCi = \frac{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (Dj^2) \right] / n}}{(Di / 100)}$
4. Índice de competencia de diámetro cuadrático densidad	$IDCNi = \frac{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^n (Dj^2) \right]}}{(Di / 100)} (N)$
5. Índice de competencia de área basal total	$IGTi = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\pi \left((Dj / 2)^2 \right) \right]}{\pi (Di / 2)^2}$
6. Índice de competencia de área basal total densidad	$IGTNi = \frac{\sum_{j=1}^n \left[\pi \left((Dj / 2)^2 \right) \right]}{\pi (Di / 2)^2} (N)$
7. Índice de competencia de diámetro máximo	$IDMAXi = \left(\frac{Dj \max}{Di} \right)$
8. Índice de competencia de altura total máxima	$IHMAXi = \left(\frac{Hj \max}{Hi} \right)$
9. Índice de competencia de área basal máxima	$IGMAXi = \frac{\pi \left((Dj \max / 2)^2 \right)}{\pi (Di / 2)^2}$
10. Índice de competencia de volumen medio	$IVMi = \frac{\left[\sum_{j=1}^n Vj / n \right]}{Vi}$

Donde: *Di*= Diámetro normal del árbol sujeto a competencia. *Dj*= Diámetro normal del árbol competidor. *n*= Número de árboles dentro del cuadrante. $\pi = 3.14159$. *N*= Número de árboles por hectárea. *Djmax*= Diámetro normal máximo del competidor "j". *Hjmax*= Árbol con la altura máxima del competidor "j" en el cuadrante. *Hi* = Altura total de cada árbol sujeto a competencia "i". *Vj*= Es representado por el volumen para cada árbol competidor "j". *Vi*= Es el volumen del árbol "i" sujeto a competencia.

Where: *Di* = Normal diameter of the tree subject to competition. *Dj* = Normal diameter of the competing tree. *n* = Number of trees within the quadrant. $\pi = 3.14159$. *N* = Number of trees per hectare. *Djmax* = Maximum normal diameter of the competitor "j". *Hjmax* = Tree with maximum height of competitor "j" in the quadrant. *Hi* = Total height of each tree subject to competition "i". *Vj* = Is represented by the volume for each competing tree "j". *Vi* = Is the volume of tree "i" subject to competition.

variables edad (*t*) y altura total promedio del cuadrante (*H*); mientras que el número total de los modelos está determinado por los tres índices de densidad considerados (*N*, *G1* y *V1*) que incorporan cada uno de los índices de competencia evaluados (Cuadro 1). En la búsqueda de los mejores modelos, el proceso involucró la transformación y combinación de las anteriores variables independientes, comparándose posteriormente su relativo desempeño.

El mejor modelo para representar el crecimiento en volumen para bosques mezclados, en su forma general se expresa de la siguiente manera:

$$LNY = \beta_1 \cdot ID + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LNH + \beta_4 \cdot LNIC$$

mathematical models were evaluated in their logarithmic form, in which the variables age (*t*) and average total height of the quadrant (*H*) appear as constants; whereas the total number of models is determined by the three density indices considered (*N*, *G1* and *V1*), which incorporate each one of the competition indices evaluated (Table 1). In the search for best models the process involved the transformation and combination of the above independent variables, later comparing their relative performance.

The best model for representing volume growth for mixed forests is expressed in its general form as follows:

$$LNY = \beta_1 \cdot ID + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LNH + \beta_4 \cdot LNIC$$

Donde:

$LN Y$ = logaritmo natural del crecimiento en volumen ($m^3 \cdot ha^{-1}$) en seis años.

ID = Índices de Densidad N , $G1$ y $VOL1$.

t = Edad promedio en el cuadrante en años.

$LN H$ = Logaritmo natural de la altura total promedio por cuadrante en metros.

$LN IC$ = Logaritmo natural de los Índices de Competencia IG , IGN , IDC , $IDCN$, IGT , $IGTN$, $IDMAX$, $IHMAX$, $IGMAX$ e IVM .

β_1 , β_2 , β_3 y β_4 = Parámetros estimados.

Para la selección de los mejores modelos matemáticos, fueron considerados los estadísticos: cuadrado medio del error (CME), coeficiente de determinación (R^2), prueba de F y la prueba de hipótesis de los parámetros. Además, el nivel de exactitud de los parámetros y que no hubiera problemas con los signos de las estimaciones, de manera que sus valores reflejaran el efecto esperado de las variables independientes sobre la variable a explicar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el Cuadro 2, se presentan los grados de ajuste de los ocho mejores modelos obtenidos. Con respecto a los valores en el estadístico R^2 se nota muy poca variación, explicando los modelos en promedio un 99 % del crecimiento en volumen a nivel rodal para bosques mezclados. Lo anterior se confirma con lo señalado por Hokka *et al.* (1997), quienes indican que las mejores predicciones, por lo general, se encuentran en los modelos de tipo logarítmico, ya que hacen que se reduzca la varianza y mejore el grado de ajuste. En relación a lo anterior, los mejores modelos independientes de la distancia estudiados por Martin y Ek (1984), presentaron R^2 máximos de 0.64.

El R^2 y el CME, indican cuáles fueron los mejores índices para predecir el incremento en volumen; en cuanto a los índices de densidad considerados, se observa que el N , $G1$ y $V1$, pueden ser buenos predictores dentro de un modelo; mientras que los mejores índices de competencia resultaron ser el índice de competencia de área basal densidad (IGN), índice de competencia de diámetro cuadrático densidad ($IDCN$), índice de competencia de área basal total densidad ($IGTN$) y el índice de competencia de altura total máxima ($IHMAX$). La efectividad de los modelos se corrobora con los valores en el CME y su alto grado de significancia con $Prob > F = 0.0001$, mientras que los bajos valores en el coeficiente de variación (CV) indican muy poca variación de los modelos para describir los resultados esperados del incremento volumétrico.

where:

$LN Y$ = natural logarithm of the volume growth ($m^3 \cdot ha^{-1}$) in six years.

ID = Density Indices N , $G1$ and $VOL1$.

t = Average age in the quadrant in years.

$LN H$ = Natural logarithm of the average total height per quadrant in meters.

$LN IC$ = Natural logarithm of the Competition Indices IG , IGN , IDC , $IDCN$, IGT , $IGTN$, $IDMAX$, $IHMAX$, $IGMAX$ and IVM .

β_1 , β_2 , β_3 , and β_4 = Estimated parameters.

For the selection of the best mathematical models, the following statistics were considered: mean square of the error (MSE), coefficient of determination (R^2), F test and the hypothesis test of the parameters. Also considered were the level of exactness of the parameters and not existing problems with the signs of the estimations, so that their values reflect the expected effect of the independent variables over the variable to explain.

RESULTS AND DISCUSSION

Table 2 shows the degrees of fit of the eight best models obtained. With respect to the values in the R^2 statistic, very little variation is noted, the models explaining an average of 99 % of the growth in volume at the stand level for mixed forests. The above is confirmed with what was indicated by Hokka *et al.* (1997), who affirm that the best predictions are generally found in the logarithmic type models, given that they reduce the variance and improve the degree of fit. With respect to the above, the best distance independent models studied by Martin and Ek (1984) presented maximum R^2 of 0.64.

The R^2 and the MSE indicate which were the best indices for predicting the increment in volume. With respect to the density indices considered, it is observed that the N , $G1$ and $V1$ can be good predictors within a model; whereas the best competition indices were the basal area density competition index (IGN), quadratic diameter density competition index ($IDCN$), total basal area density competition index ($IGTN$) and the maximum total height competition index ($IHMAX$). The effectiveness of the models is proven with the values in the MSE and its high degree of significance with $Prob > F = 0.0001$, whereas the low values in the coefficient of variation (CV) indicate very little variation of the models for describing the expected results of the volumetric increment.

With respect to the estimators, Table 3 shows the estimation of the parameter and its level of significance

CUADRO 2. Estadísticos de regresión.

TABLE 2. Statistics of regression.

Modelo	CME	Prob>F	R ²	CV
1. $LN Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIGN$	0.12696	0.0001	0.9917	9.48
2. $LN Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIDCN$	0.12869	0.0001	0.9916	9.54
3. $LN Y = \beta_1 \cdot N + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIGTN$	0.11651	0.0001	0.9924	9.08
4. $LN Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIGN$	0.08791	0.0001	0.9943	7.89
5. $LN Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIDCN$	0.08865	0.0001	0.9942	7.92
6. $LN Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIGTN$	0.07915	0.0001	0.9948	7.48
7. $LN Y = \beta_1 \cdot G1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIHMAX$	0.24062	0.0001	0.9843	13.05
8. $LN Y = \beta_1 \cdot V1 + \beta_2 \cdot t + \beta_3 \cdot LN H + \beta_4 \cdot LNIGTN$	0.09900	0.0001	0.9935	8.37

Con respecto a los estimadores, en el Cuadro 3 se presenta la estimación del parámetro y su nivel de significancia ($Prob > |t|$). Para este último estadístico, se observa que no existen diferencias significativas ya que todos los modelos presentan un alto nivel de exactitud con $Prob > |t| = 0.0001$. Las estimaciones de los coeficientes de regresión de cada variable independiente de los modelos tiene un valor significativo, lo cual demuestra que contribuyen a estimar con precisión la variable dependiente, definida como el incremento en volumen para rodales que crecen de manera natural en bosques mezclados.

Con relación al resto de los modelos analizados en la presente investigación, no se hace referencia ya que aún y cuando presentaron un coeficiente de determinación igual o similar a los modelos presentados, el nivel de significancia de las estimaciones de sus parámetros fue menor.

Modelización del crecimiento

La modelización del crecimiento para los árboles presentes en un rodal, puede realizarse con el sistema de cómputo SAS®. A manera de ejemplo, se eligió el modelo logarítmico número 8, pudiéndose observar sus altos ajustes en el Cuadro 4; para obtener los resultados anteriores, se tomaron como datos base los obtenidos en el año 2001 ($V1$, t y H), además del valor del índice de competencia $IGTN$ obtenido con esos mismos datos y los valores de los estimadores (β 's) fueron tomados del Cuadro 3. El valor del $V2$ (volumen por hectárea del año 2007), sirvió de referencia para calcular el incremento en volumen durante ese período de seis años ($INCVOL$). En la columna marcada como $INCV PRED$, se relacionan los

($Prob > |t|$). For this last statistic, it is observed that there are no significance differences, given that all of the models present a high level of exactness with $Prob > |t| = 0.0001$. The estimations of the coefficients of regression of each independent variable of the models has a significant value, which demonstrates that they contribute to the precise estimation of the dependent variable, defined as the increment in volume for stands that grow naturally in mixed forests.

With respect to the rest of the models analyzed in the present investigation, no reference is made, given that even when they presented a coefficient of determination equal or similar to the models presented, the significance level of the estimations of their parameters was lower.

Modeling of growth

The modeling of growth for the trees present in a stand can be carried out with the SAS® computer system. As an example, logarithmic model number 8 was selected,; its high adjustments can be observed in Table 4. To obtain the above results, the data base was taken from those obtained in 2001 ($V1$, t and H), along with the value of the competition index $IGTN$ obtained with these same data, and the values of the estimators (β 's) were taken from Table 3. The value of $V2$ (volume per hectare of 2007) served as reference to calculate the increment in volume during this six year period ($INCVOL$). In the column marked as $INCV PRED$, the volumes predicted by the model were related. In general, these volumes present a slight variation with respect to those observed. However, this situation is considered acceptable within the statistical parameters obtained in

CUADRO 3. Estadísticos de los estimadores y su nivel de significancia muestral.

TABLE 3. Statistics of the estimators and their level of sampling significance.

Modelo	Estimador β_1	Estimador β_2	Estimador β_3	Estimador β_4	Prob> t
1	0.00072175	-0.02757	1.28760	0.18763	0.0001
2	0.00073997	-0.02735	1.32929	0.17696	0.0001
3	0.00054960	-0.02651	1.23438	0.15738	0.0001
4	0.05668000	-0.03301	0.63002	0.37700	0.0001
5	0.05846000	-0.03232	0.66503	0.37038	0.0001
6	0.04475000	-0.03107	0.81092	0.24339	0.0001
7	0.05002000	-0.06283	2.02026	1.56419	0.0001
8	0.00494000	-0.03766	0.66845	0.30721	0.0001

CUADRO 4. Modelización del crecimiento.**TABLE 4. Modeling of growth.**

S	C	V1 (m ³ r·ha ⁻¹)	t (años)	H (m)	IGTN (m ³ r·ha ⁻¹)	V2 (m ³ r·ha ⁻¹)	INCVOL (m ³ r·ha ⁻¹)	INCVRED (m ³ r·ha ⁻¹)
4	4	49.766	19.3	10.84	5065.75	92.682	42.916	41.790
7	4	30.500	13.6	5.45	23054.35	79.259	48.759	47.372
10	1	66.119	14.3	8.52	19587.22	134.997	68.878	70.544
12	1	13.203	14.4	5.73	2276.36	36.277	23.074	21.428
12	3	20.042	14.5	5.60	6024.82	49.105	29.063	29.323
15	3	72.807	13.4	6.98	106552.41	181.113	108.306	111.078
16	1	24.541	17.3	5.61	15484.01	59.431	34.89	36.101
16	3	18.610	15.3	4.92	17800.79	54.969	36.359	36.142
21	1	6.289	11.6	4.70	3688.89	28.193	21.904	23.379
25	2	48.048	14.7	5.97	62504.74	119.618	71.569	71.566
29	4	15.849	10.9	4.84	16245.82	58.251	42.402	40.466

Donde: S= Sitio. C= Cuadrante. V1= volumen del año 2001. t= Edad promedio del cuadrante. H= Altura total promedio del cuadrante. IGTN= Factor del índice de competencia. V2= volumen del año 2007. INCVOL= Incremento en volumen en seis años. INCVRED= Incremento en volumen predicho por el modelo para el mismo período de seis años.

Where: S = Site. C = Quadrant. V1 = volume of 2001. t = Average age of the quadrant. IGTN = Factor of the competition index. V2 = volume of 2007. INCVOL = Increment in volume in six years. INCVRED = increment in volume predicted by the model for the same six years period.

volúmenes predichos por el modelo. En general dichos volúmenes, tienen una ligera variación con respecto a los observados; sin embargo, esta situación se considera aceptable dentro de los parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de varianza. De la misma forma como se mostró el funcionamiento del modelo seleccionado, se pueden reproducir los resultados del resto de los modelos obtenidos en la presente investigación.

Contrario a lo señalado por algunos autores quienes aseguran que en relación con los índices dependientes de la distancia, los índices independientes de la distancia no son tan eficientes como los primeros para predecir el crecimiento de los árboles; los resultados obtenidos en el presente trabajo, demuestran que también es posible modelar el crecimiento a nivel rodal con índices independientes de la distancia de una manera aceptable, lo cual se corrobora en la Figura 2, en donde se observan las gráficas de dispersión de los valores observados y predichos con los modelos propuestos en el presente trabajo.

En los resultados obtenidos se observa que los modelos que mayor contribuyen a modelar el crecimiento son los que contienen información de área basal; al respecto Biging y Dobbertin (1995), señalan que los modelos con índices independientes de la distancia mejoran al incluir variables con densidad puntual (rodal), mientras que Daniels *et al.* (1986), concluyeron que en general todos los índices de competencia se correlacionan significativamente con el crecimiento del área basal. Con respecto a la bondad de ajuste de las variables de área basal, es posible que se deba a que relacionan la competencia y la densidad tal y como se presenta en un bosque mezclado o natural.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el incremento en volumen de un rodal, está determinado en gran medida

the analysis of variance. In the same way as shown by the functioning of the selected model, the results of the rest of the models obtained in the present investigation can be reproduced.

Contrary to what was pointed out by some authors who affirm that with respect to the distance-dependent indices, the distance-independent indices are not as efficient as the first for predicting tree growth. The results obtained in the present work demonstrate that it is also possible to model growth at the stand level with distance-independent indices in an acceptable way, which is confirmed in Figure 2, which shows the graphs of dispersal of the observed and predicted values with the models proposed in the present work.

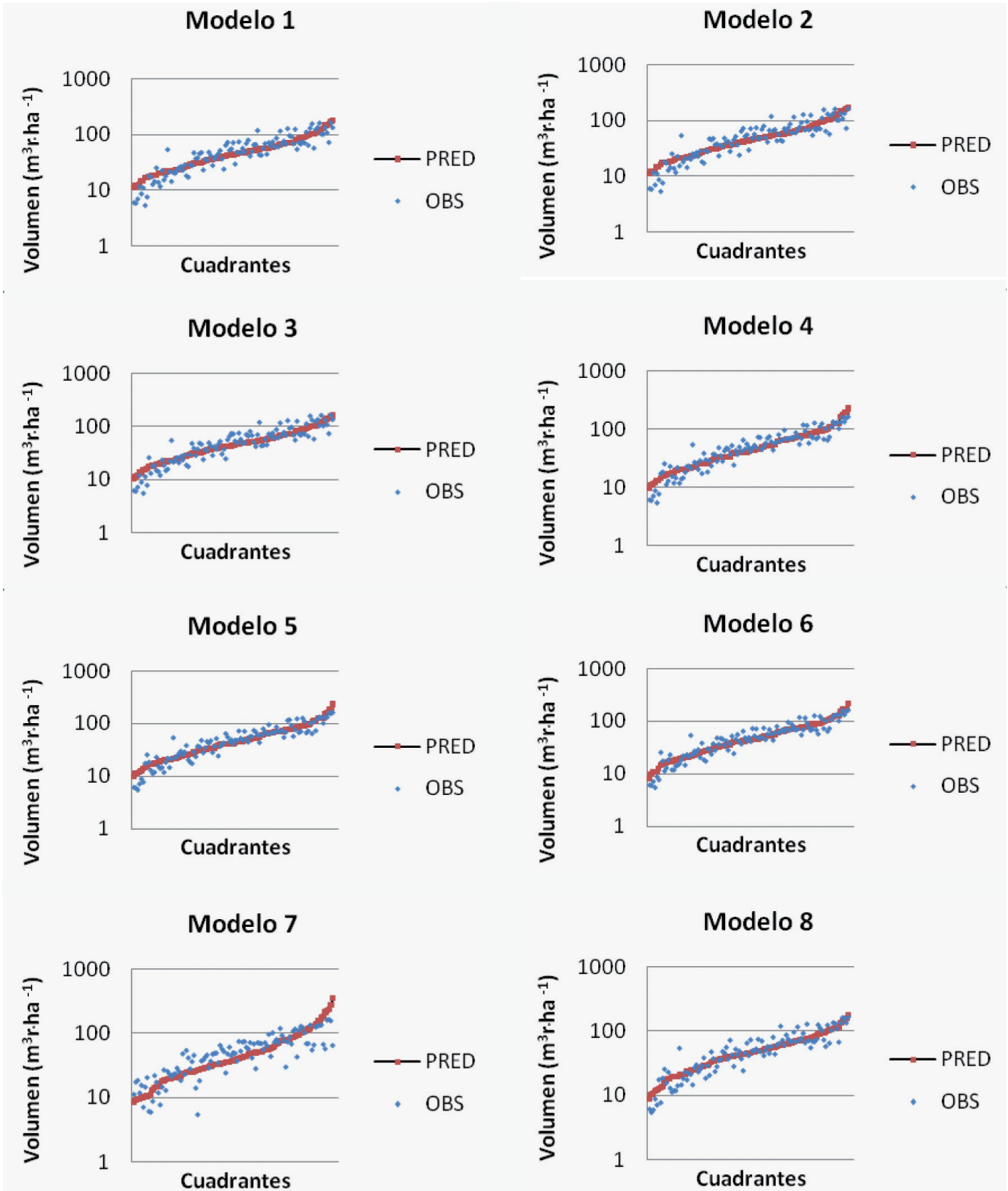
In the results obtained it is observed that the models that best contribute to modeling growth are those that contain information of basal area. To this respect, Biging and Dobbertin (1995) indicate that the models with distance-independent indices improve by including variables with punctual density (stand), whereas Daniels *et al.* (1986) concluded that in general all of the competition indices are significantly correlated with the growth of the basal area. With respect to the goodness-of-fit of the variables of the basal area, it is possible that it is due to the fact that they relate competition and density just as it is presented in a mixed or natural forest.

CONCLUSIONS

The results obtained indicate that the increment in volume of a stand is determined to a great degree by the density levels and the competition indices that explain the growth of the forest mass. Based on the analyses of variance practiced, the hypothesis is confirmed that the growth in volume of the mixed forests and its natural dynamic can be modeled mathematically, which generates

FIGURA 2. Gráficas de dispersión que relacionan los volúmenes observados y predichos.

FIGURE 2. Graphs of dispersal that relate the observed and predicted volumes.



por los niveles de densidad y los índices de competencia que explican el crecimiento de la masa forestal. Con base en los análisis de varianza practicados, se confirma la hipótesis de que el crecimiento en volumen de los bosques mezclados y su dinámica natural pueden ser modelados matemáticamente, lo que genera un conocimiento importante para predecir la productividad forestal. Considerando lo anterior, las técnicas de manejo forestal que se aplican actualmente, pueden servir de base para incorporar modelos de simulación validados que permitan medir sus efectos y probar alternativas de manejo para lograr aprovechamientos forestales sustentables en la región de Pueblo Nuevo, Durango.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca crédito otorgada al primer autor para realizar estudios de doctorado en la Facultad de Ciencias Forestales en Linares, Nuevo León, México. Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y a la Unidad de Servicios Técnicos Forestales del Ejido Pueblo Nuevo, por permitir la facilidad de los trabajos de investigación de campo.

LITERATURA CITADA

- ARNEY, J. D. 1973. Tables to quantifying competitive stress individual trees. Can. For. Serv. Pac. For. Res. Cent. Inf. Rep. BC-X-78.
- BELLA, L. E. 1971. A new competition model for individual trees. For. Sci. 17: 364-372.
- 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(3): 695-720.
- BIGING, G. S.; DOBBERTIN, M. 1995. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. For. Sci. 4(2): 360-377.
- CANO C., J. 1998. El sistema de manejo regular en los bosques de México. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. México. 224 p.
- CURTIS, R. O. 1970. Stand density measures: an interpretation. Forest Sci. 16(4): 403-414.
- DANIELS, R. F. 1976. Simple competition indices and their correlation with annual loblolly pine tree growth. For. Sci. 22:454-456.
- DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. 1986. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. Can. J. For. Res. 16:1230-1237.
- DAVIS, L. S.; JOHNSON, K. N. 1987. Forest Management. Third Edition. McGraw-Hill Book Company. pp. 1-166.
- EK, A. R.; MONSERUD, R. A. 1974. Forest: A Computer model for simulating the growthland reproduction of mixed species forest stands. Res. Rep. R2635, University of Wisconsin, College of Agriculture and Life Science. 90 p.
- GARCÍA A., E. 1973. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (adaptada para la República Mexicana). Instituto de Geografía. México, D.F. 246 p.
- GERRARD, D. I. 1969. Competition quotient: a new measure for the competition affecting individual forest trees. En: Michigan

important knowledge for predicting forest productivity. Considering the above, the forest management techniques that are now applied can serve as a base for incorporating validated simulation models that make it possible to measure their effects and to test management alternatives for achieving sustainable forest use in the region of Pueblo Nuevo, Durango.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) for the grant awarded to the first author to carry out doctoral studies in the Facultad de Ciencias Forestales in Linares, Nuevo León, Mexico. We would also like to express our thanks to the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) and to the Unidad de Servicios Técnicos Forestales del Ejido Pueblo Nuevo, for permitting the facility of the field work investigation.

End of English Version

State University Agricultural Research Station, Research Bulletin 20: 1-32.

- GLOVER, G. R.; HOOL, J. N. 1979. A basal area ratio predictor of loblolly pine plantation mortality. For. Sci. 25. 275-282.
- HEGYI, F. 1974. A simulation model for managing jack-pine stands. In: Fries, J.(Ed.): Growth models for tree and stand simulation. Royal College of Forest, Stockholm: 74-90.
- HOKKA H., V. A.; PENTTILA, T. 1997. Individual-trees basal area growth models for Scots Pine, Pubescent Birch and Norway Spruce on Drained Peatlands in Finland. Silva Fennica. 31(2):161-178.
- MARTIN, G. L.; EK, A. R. 1984. A comparison of competition measures and growth models for predicting plantation red pine diameter and height growth. For. Sci. 30:731-743.
- MERAZ A., R. 2008. Modificación al Programa de Manejo Forestal para el Ejido Pueblo Nuevo, Dgo. Servicios Técnicos Forestales del Ejido Pueblo Nuevo, p. 6-32.
- MUNRO, D. D. 1974. Forest growth models: a prognosis, in Growth Models for Tree and Stand Simulation. Stockholm: Royal College of Forestry, (ed. J. Fries), Res. Note 30, Dept. Forest Yield. p. 7-21.
- PENG, C. 2000. Growth and yield models for unevenaged stands: past, present and future. Forest Ecology and Management 132: 259-279.
- SAS INSTITUTE INC. SAS® 9.1. 2009. User's guide. Cary, NC, USA.
- SPURR, S. H. 1962. A measure of point density. Forest Sci. 8(1): 85-96.
- STAEBLER, G. R. 1951. Growth and spacing in an unevenaged stand of Douglas Fir. University Mich. M. F. thesis. 100 p.
- TOMÉ, M.; BURKHART, H. E. 1989. Distance-dependent competition measures for predicting growth of individual trees. Forest Sci. 35(3): 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.; TORRES-ROJO, J. M.; VELÁZQUEZ M., A.; RODRÍGUEZ F., C. 1998. Relación de nueve índices de competen-

- cia con el crecimiento en diámetro de *Pinus cooperi* Blanco. *Agrociencia* 32(3): 255-260.
- VALLES G., A. G.; GONZÁLEZ L., R. F.; GALLEGOS, I. A.; TORRES-ROJO, J. M.; NÁVAR CH., J. J.; ROCHA, F. M. 2003. Evaluación de índices de competencia independientes de la distancia con modelos de crecimiento en diámetro en *Pinus cooperi* Blanco. Resumen VI Congreso Mexicano de Recursos Forestales. SOMEREF. UASLP. P 53-55.
- VANCLAY, J. K. 1991. Review of Competition Indices: What have we learned, where should we use them and what additional research is required?. Royal Veterinary and Agricultural University Thorvaldsensvej 57, DK-1871 Frederiksberg, Denmark. 19 p.
- ZEIDE, B. 2005. How to measure stand density. *Trees*. 19: 1-14.
- ZEPEDA B., E. M.; VILLARREAL D., M. E. 1987. Guía de densidad para *Pinus hartwegii* Lindl. de Zoquiapan, Méx. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo, Méx. 52 p.