



Artículo / Article

# Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados

## Selection of outstanding mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in a natural stand based on multivariate methods

Benito N. Gutiérrez Vázquez<sup>1</sup>, Eladio H. Cornejo Oviedo<sup>2</sup>, Bartolo Rodríguez Santiago<sup>3</sup>,  
Javier López Upton<sup>4</sup>, Mario H. Gutiérrez Vázquez<sup>1</sup>, Martín Gómez Cárdenas<sup>5</sup> y Amelia Flores Montaña<sup>1</sup>

### Resumen

Se describe una metodología para seleccionar árboles fenotípicamente superiores en rodales naturales de especies tropicales mediante métodos multivariados, con la técnica de análisis de componentes principales (ACP) y la de agrupamiento, con apoyo del programa "Stand Visualization System" (SVS). El estudio se efectuó en un rodal de 50 ha de caoba (*Swietenia macrophylla*) dentro de una selva mediana subperennifolia, donde se definió una población base de 427 árboles con un diámetro normal mayor a 7.5 cm. Se utilizó el método de ACP con datos de ocho variables de estructura del árbol. Las correspondientes al diámetro normal del fuste, altura total y diámetro de copa fueron las que mejor identificaron las características fenotípicas de los ejemplares superiores en el primer componente, al explicar 79.4 % de la varianza total. La aplicación del SVS permitió el análisis espacial de escenarios posibles y finalmente la ubicación de 30 árboles sobresalientes. El diferencial de selección para las características de interés económico dio valores positivos y entre ellos destaca el diámetro normal que corresponde a 84 % de la población base, y el de copa con 61 %. El método basado en ACP resultó efectivo porque los árboles elegidos por este conducto fueron los mejores en campo, por lo que se puede recomendar dicho procedimiento para escoger a los árboles superiores en rodales naturales de especies tropicales, donde las condiciones limitan el uso de los métodos clásicos de selección como el comparativo.

**Palabras clave:** Análisis de componentes principales, árbol superior, características fenotípicas, diferencial de selección, ganancia genética, *Swietenia macrophylla* King.

### Abstract

A methodology to select phenotypically outstanding trees in a natural stand of tropical species based on multivariate methods using the technique of principal components analysis (PCA) and with support of the software System Visualization Stand (SVS) is described here. This study was conducted on a natural stand of mahogany (*Swietenia macrophylla*) of 50 ha, located in a semi-evergreen forest. A base population of 427 mahogany trees with a normal diameter higher than 7.5 cm was defined. The method of PCA was used with data of eight variables of stem, cup and buttress. The variables stem normal diameter, total height and crown diameter, were the ones that better identified the characteristic phenotype of the selected trees in the first component, explaining 79.4 % of the total variance. The application of SVS allowed the spatial analysis of possible scenarios and the selection of 30 plus trees, when setting down as restriction a minimum distance of 70 m between selected trees. The selection differential for the characteristics of economic interest gave positive values. The normal diameter had a higher selection differential (84 %) than that of the crown diameter with 61 %. The PCA-based method proved to be effective since the plus trees selected by it were the best in the field. These results allow recommending the PCA method for selecting superior trees in a natural stand of tropical species, where conditions limit the use of classic methods of selection such as the comparative one.

**Key words:** Principal components analysis, plus tree, phenotype characteristics, selection differential, genetic gain, *Swietenia macrophylla* King.

Fecha de recepción/ Reception date: 15 de enero de 2016; Fecha de aceptación/Acceptance date: 21 de julio de 2016.

<sup>1</sup> Consultores para la Investigación Aplicada y el Desarrollo Forestal, S. C. México. Correo-e: bngutierrez@hotmail.com

<sup>2</sup> Departamento Forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México.

<sup>3</sup> Campo Experimental Chetumal. Centro de Investigación Regional Sureste (CIRSE). INIFAP. México.

<sup>4</sup> Programa Forestal. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. México.

<sup>5</sup> Campo Experimental Uruapan. Centro de Investigación Regional Pacífico Centro (CIRPAC). INIFAP. México.

## Introducción

El mejoramiento genético de árboles ha llegado a ser parte significativa del manejo intensivo de bosques. La primera fase en un programa de este tipo para especies nativas es generalmente la selección de fenotipos superiores o de alto rendimiento en poblaciones naturales (Ledig, 1974), por lo que su identificación es fundamental, ya que de ellos depende la ganancia hereditaria que se alcance.

El conocimiento más importante sobre el tema nació a finales de los década de los 50 con el género *Pinus* (Zobel y Talbert, 1988), lo que hace suponer que los criterios utilizados para pinos no coinciden del todo con los destinados a latifoliadas tropicales. Maldonado y Escobar (2000) abordaron este tópico en los últimos años, y usaron un método de puntaje subjetivo para escoger los mejores ejemplares de *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake conocido como "frijolito", en Santander, Colombia; Murillo *et al.* (2010) trabajaron sobre el particular en plantaciones forestales, con base en el método clásico de comparación (Zobel y Talbert, 1988).

Sin embargo, con frecuencia en los rodales naturales de especies tropicales no es factible aplicar los procedimientos mencionados debido a que están conformados por una mezcla de muchas especies, y los árboles candidato están tan dispersos que no existen testigos cercanos para contrastarlos; además, algunos individuos pueden retoñar de forma vigorosa y los que crecen cerca del de interés tienen un sistema de raíces común y el mismo genotipo (Zobel y Talbert, 1988).

En la práctica, la selección en estos ambientes se hace a partir de diferentes criterios (Salazar y Boshier, 1989); por ejemplo, una serie de grados numéricos o valores asignados a variables como altura, volumen, tamaño de ramas, ancho de copa, ángulo de ramas, habilidad de poda (e.g., se refiere a que las ramas inferiores se secan y caen rápidamente de manera natural) y forma de fuste (Brown y Goddard, 1961; Wright, 1964). Lo anterior ocasiona que el mejorador escoja los árboles de acuerdo con un juicio subjetivo, sin contar con el soporte de un análisis estadístico que elimine dicha condición, y que no cumpla con el objetivo del mejoramiento genético.

En los programas de este tipo, por lo general se desea mejorar varias características a la vez, por lo que desde la primera fase del proceso se buscan árboles superiores en más de una de ellas (Stonecypher, 1970); no obstante, la información de la primera generación con frecuencia es más bien visual (Torres, 2000). Un método de evaluación eficiente es el índice de selección, porque tiene la ventaja de orientarse a genotipos con base en elementos fenotípicos múltiples (Zobel y Talbert, 1988). En este contexto, el índice se puede abordar a través del método multivariado que se basa en el análisis de componentes principales (ACP), cuyo primer componente

## Introduction

Genetic tree breeding has become a significant part of intensive forest management. The first phase in a program of this type for native species is generally the selection of higher or high yielding phenotypes in natural populations (Ledig, 1974), so their identification is fundamental, since on them depends the hereditary gain that is scope.

The most important knowledge on the subject was born in the late 1950s with the genus *Pinus* (Zobel and Talbert, 1988), suggesting that the criteria used for pine trees do not entirely coincide with those for tropical hardwoods. Maldonado and Escobar (2000) addressed this topic in recent years, and used a subjective scoring method to choose the best specimens of *Schizolobium parahyba* (Vell.) S. F. Blake known as "frijolito", in Santander, Colombia; Murillo *et al.* (2010) worked on forestry plantations based on the classical method of comparison (Zobel and Talbert, 1988).

However, in natural stands of tropical species it is often not feasible to apply the aforementioned procedures because they are made up of a mixture of many species, and the candidate trees are so dispersed that there are no close controls to check them. In addition, some individuals can vigorously sprout and those growing near the one of interest have a common root system and the same genotype (Zobel and Talbert, 1988).

In practice, the selection in these environments is made from different criteria (Salazar and Boshier, 1989); for example, a series of numerical degrees or values assigned to variables such as height, volume, branch size, crown width, branch angle, pruning ability (i. e., refers to lower branches drying and falling rapidly naturally) and stem shape (Brown and Goddard, 1961; Wright, 1964). This causes the breeder to choose the trees according to a subjective judgment, without the support of a statistical analysis that eliminates such condition, and that does not meet the objective of genetic improvement.

In programs of this type, it is usually desired to improve several characteristics at the same time, so that from the first phase of the process, upper trees are sought in more than one of them (Stonecypher, 1970). However, information from the first generation is often rather visual (Torres, 2000). An efficient evaluation method is the selection index, because it has the advantage of being oriented to genotypes based on multiple phenotypic elements (Zobel and Talbert, 1988). In this context, the index can be approached through the multivariate method that is based on the main component analysis (PCA), whose first main component (PC) determines the proportion and own vector of the phenotypic values under study, which contribute to the new index (Cerón and Sahagún, 2005).

principal (CP) determina la proporción y vector propio de los valores fenotípicos en estudio, que contribuyen al nuevo índice (Cerón y Sahagún, 2005).

El uso actual del índice de selección a través de CP en el mejoramiento genético forestal es mínimo, y entre los pocos casos puede citarse el de árboles semilleros de *Pinus greggii* Engelm. Parl para la conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero (Cornejo *et al.*, 2009), y la transformación de un ensayo de progenies de *P. greggii* var. *greggii* Engelm. ex Parl. a huerto semillero (Gutiérrez *et al.*, 2010). Existe poca evidencia sobre el particular en el trópico mexicano en bosques naturales, debido a las limitaciones para la aplicación de los métodos clásicos de selección, por la subjetividad que puede ocurrir al carecer de respaldo estadístico.

Con base en todo lo anterior, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficacia de los métodos multivariados en la selección de árboles fenotípicamente superiores de *Swietenia macrophylla* King.

## Materiales y Métodos

### El área de estudio

Esta investigación se llevó a cabo en un rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla*) localizado en la selva mediana subperennifolia en el Ejido X-Hazil y Anexos, municipio Felipe Carrillo Puerto, en el estado de Quintana Roo, México, a una altitud de 16 m. La delimitación del área se hizo mediante recorridos en el perímetro del predio y caminos de acceso, para georreferenciar los vértices con un error de muestreo de  $\pm 3$  m. El área de estudio se localiza entre las coordenadas 19°21'58.74" N y 88°02'58.74" O, en una superficie de 50 ha.

Dentro del área de estudio se establecieron de manera sistemática 30 sitios de muestreo circulares de 500 m<sup>2</sup> (radio = 12.61 m), y en cada uno de ellos se determinó: estado físico del arbolado de especies diversas; presencia de ejemplares de caoba con un diámetro normal a 1.30 m sobre el suelo  $\geq$  a 7.5 cm; diámetro y altura total promedios; especies dominantes; existencia de perturbaciones ocasionadas por actividades de extracción, incendios y huracanes. En cada centro del sitio se colocó una estaca de madera con una placa metálica para indicar el número del sitio y sus coordenadas. La identificación de los árboles que formaron la población base (427 árboles de caoba), se hizo mediante un reconocimiento en el rodal de 50 ha, con recorridos en caminos y brechas.

Los 427 árboles de interés se ubicaron individualmente con coordenadas y se les midieron las siguientes variables: diámetro normal del fuste; diámetro de copa del árbol (m), calculado como el promedio de la proyección de la misma sobre el suelo en los dos puntos más alejados y el diámetro de

The current use of the selection index through PC in forest genetic improvement is minimal, and among the few cases can be mentioned the tree seedlings of *Pinus greggii* Engelm. Parl for the conversion of a provenance test to a seed stand (Cornejo *et al.*, 2009), and the transformation of a progeny test of *P. greggii* var. *greggii* Engelm. ex Parl. a seed orchard (Gutiérrez *et al.*, 2010). There is little evidence on the particular in the Mexican tropics in natural forests, due to the limitations to the application of the classic methods of selection, by the subjectivity that can happen from the lack of statistical support.

Based on all of the above, the present study aimed to evaluate the efficacy of multivariate methods in the selection of phenotypically superior trees of *Swietenia macrophylla* King.

## Materials and Methods

### Study area

This research was carried out in a natural stand of mahogany (*Swietenia macrophylla*) located in the middle subperennifolia forest in Ejido X-Hazil and Annexes, Felipe Carrillo Puerto municipality, in the state of Quintana Roo, Mexico, at an altitude of 16 m. The delimitation of the area was made through paths in the perimeter of the property and access roads, to georeferentiate the vertices with a sampling error of  $\pm 3$  m. The study area is located between the coordinates 19°21'58.74" N and 88°02'58.74" W, on an area of 50 ha.

Within the study area, 30 circular sampling sites of 500 m<sup>2</sup> (radius = 12.61 m) were systematically established, and in each one of them was determined: physical condition of the tree of diverse species; presence of mahogany specimens with a  $\geq 7.5$  cm normal diameter at 1.30 m above the ground; diameter and total height averages; dominant species; existence of disturbances caused by extraction activities, fires and hurricanes. In each center of the site a wooden stake with a metal plate was placed to indicate the site number and its coordinates. The identification of the trees that formed the base population (427 mahogany trees), was done by means of a reconnaissance in the stand of 50 ha, with walks in roads and paths.

The 427 trees of interest were placed individually with coordinates and were measured with the following variables: normal diameter of the stem; tree cup diameter (m), calculated as the average of the projection of it on the ground in the two most distant points and the smaller cup diameter measured perpendicular to the larger diameter; total height (m); height of clean stem (m), to the point where the crown or commercial height begins; slenderness index, calculated as the ratio of total height between height of the clean trunk; number of buttresses and their height; and phytosanitary status with a two-level visual scale, healthy or diseased.

copa menor medido perpendicular al diámetro mayor; altura total (m); altura de fuste limpio (m), al punto donde inicia la copa o altura comercial; índice de esbeltez, calculado como la relación de altura total entre altura del fuste limpio; número de contrafuertes y su altura; y estado fitosanitario con una escala visual de dos niveles, sano o enfermo.

## Selección de árboles

La selección de árboles sobresalientes se hizo mediante dos análisis multivariados, uno de componentes principales (ACP) y uno de agrupamiento. Los valores de cada variable se estandarizaron con la siguiente fórmula:

$$Z_{ij} = \left( \frac{X_{ij}}{S_j} \right)$$

Donde:

$Z_{ij}$  = Nuevo valor estandarizado

$X_{ij}$  = Valor de la observación  $i$  en la variable  $j$

$S_j$  = Desviación típica o estándar de los valores de la variable  $j$

Para calcular las variables útiles en la selección de árboles, el primer paso consistió en aplicar el ACP con el procedimiento PRINCOMP del paquete *Statistical Analysis System* (SAS, 1999) versión 9.1. Mediante un proceso iterativo, este análisis permite encontrar el menor número de las que integren el primer componente principal (CP) y que mejor identifiquen al fenotipo, siempre que la varianza final sea igual o mayor a 70 % de la variación total. Durante este análisis se eliminan las variables que no acusen una alta correlación dentro del CP.

Lo anterior es importante porque el éxito de la selección de la apariencia, expresado como avance o ganancia genética, depende inicialmente de ello (Quijada, 1980). Conforme más características se consideren, resultará más difícil obtener avances en algunas de manera individual, porque cada carácter tiene un patrón hereditario diferente; por lo tanto, son necesarias intensidades de selección distintas, de modo que al escoger los individuos que satisfagan los requerimientos de una variable en particular se podría afectar a otro carácter que haya incluido fenotipos indeseables en la primera característica. Además, caracteres desiguales pueden estar inversamente correlacionados (White *et al.*, 2007), por lo que se recomienda que el número de variables que se desee destacar sea menor o igual a cinco.

El segundo paso consiste en precisar a los árboles candidatos que van a ser elegidos, a través del proceso de agrupamiento CLUSTER de SAS, que se ejecuta con los valores que el ACP haya designado a cada uno. Para definir el número óptimo de grupos se probaron los métodos *Average*, *Twostage K = 3*, *Ward Pseudo*, *Density K = 3*, *Single* y *Centroid*. El método más

## Selection of trees

The selection of plus trees was made through multivariate analysis: principal components (PCA) and clustering. The value of each variable was standardized with the following formula:

$$Z_{ij} = \left( \frac{X_{ij}}{S_j} \right)$$

Where:

$Z_{ij}$  = New standardized value

$X_{ij}$  = Value of the  $i$  observation in the  $j$  variable

$S_j$  = Typical or standard deviation of the values of the  $j$  variable

In order to calculate the useful variables in the selection of trees, the first step was to apply the PCA with the procedure PRINCOMP of the Statistical Analysis System (SAS, 1999) version 9.1 package. By means of an iterative process, this analysis allows to find the least number of those that integrate the first main component (PC) and that better identify the phenotype, provided that the final variance is equal to or greater than 70 % of the total variation. During this analysis, variables that do not show a high correlation within the PC are eliminated.

The above is important because the success of the selection of the appearance, expressed as advance or genetic gain, depends initially on it (Quijada, 1980). As more characteristics are considered, it will be more difficult to obtain advances in some of them individually, because each character has a different hereditary pattern; therefore, different intensities of selection are necessary, so that in choosing individuals that meet the requirements of a particular variable, another character that has included undesirable phenotypes in the first characteristic could be affected. In addition, unequal characters may be inversely correlated (White *et al.*, 2007), so it is recommended that the number of variables to be taken into account is less than or equal to five.

The second step is to specify the candidate trees to be chosen, through the CLUSTER SAS process, which is executed with the values that the PCA has assigned to each one. To define the optimal number of groups, the *Average*, *Twostage K = 3*, *Ward Pseudo*, *Density K = 3*, *Single* and *Centroid* methods were tested. The most effective method is the one with the highest cubic grouping (CCA) values and the pseudo F statistic (which measures the separation between all sets at the current level). In order not to lose the identification of each individual, a code is assigned according to the groups generated.

It is recommended that there be three groups: one that meets the highest values of the variables that integrate the first component and that corresponds to the candidate trees; the next one containing the intermediate trees, which if

eficaz es el que tiene los valores más altos del criterio cúbico de agrupamiento (CCA) y de la pseudo F estadística (que mide la separación entre todos los conjuntos del nivel actual). Para no perder la identificación de cada individuo se le asigna un código en función de los grupos generados.

Se recomienda que sean tres grupos: el que reúna los valores más altos de las variables que integren el primer componente y que corresponde a los árboles candidatos; el siguiente que contiene a los árboles intermedios, que en caso de ser necesario podrían ser usados como árboles candidatos; y el tercero incluye a los que registran los valores más bajos de las variables que integren el primer componente, que deben ser descartados y no elegidos.

El último paso es la ubicación y marcaje de los árboles destacados, para lo cual se utilizó el programa *Stand Visualization System (SVS) Versión 3.36* (McGaughey, 1997, 1999). Para alimentar el programa y obtener una representación real de la posición y dimensión de cada árbol dentro del rodal, se consideraron las coordenadas, el diámetro normal y la altura total de cada uno de los 427, lo que hizo posible obtener una visión del patrón de distribución espacial específico (Figura 1). Para maximizar la distancia entre los ejemplares seleccionados y evitar problemas futuros de consanguinidad, se estableció como criterio una separación mínima entre árboles de 70 m, como recomiendan Bramlett *et al.* (1977). El SVS también permite contemplar diferentes escenarios al hacer la selección y descartar árboles como los de interés. Así, cuando se localizaron algunos a una distancia menor a 70 m entre ellos, sólo se eligió a los individuos con las mejores características en diámetro normal, altura total y altura comercial.

necessary could be used as candidate trees; And the third includes those who record the lowest values of the variables that integrate the first component, which must be discarded and not chosen.

The final step is the location and marking of the trees, for which the *Stand Visualization System (SVS) Version 3.36* program was used (McGaughey, 1997, 1999). In order to feed the program and obtain a real representation of the position and dimension of each tree within the stand, the coordinates, the normal diameter and the total height of each of the 427 were considered, which allowed to obtain a vision of the distribution pattern (Figure 1). In order to maximize the distance between the selected individuals and to avoid future problems of consanguinity, a minimum separation between trees of 70 m was established as criterion, as recommended by Bramlett *et al.* (1977). The SVS also allows to contemplate different scenarios when making the selection and discarding trees as the ones of interest. Thus, when some were located at a distance of less than 70 m between them, only the individuals with the best characteristics in normal diameter, total height and commercial height were taken.

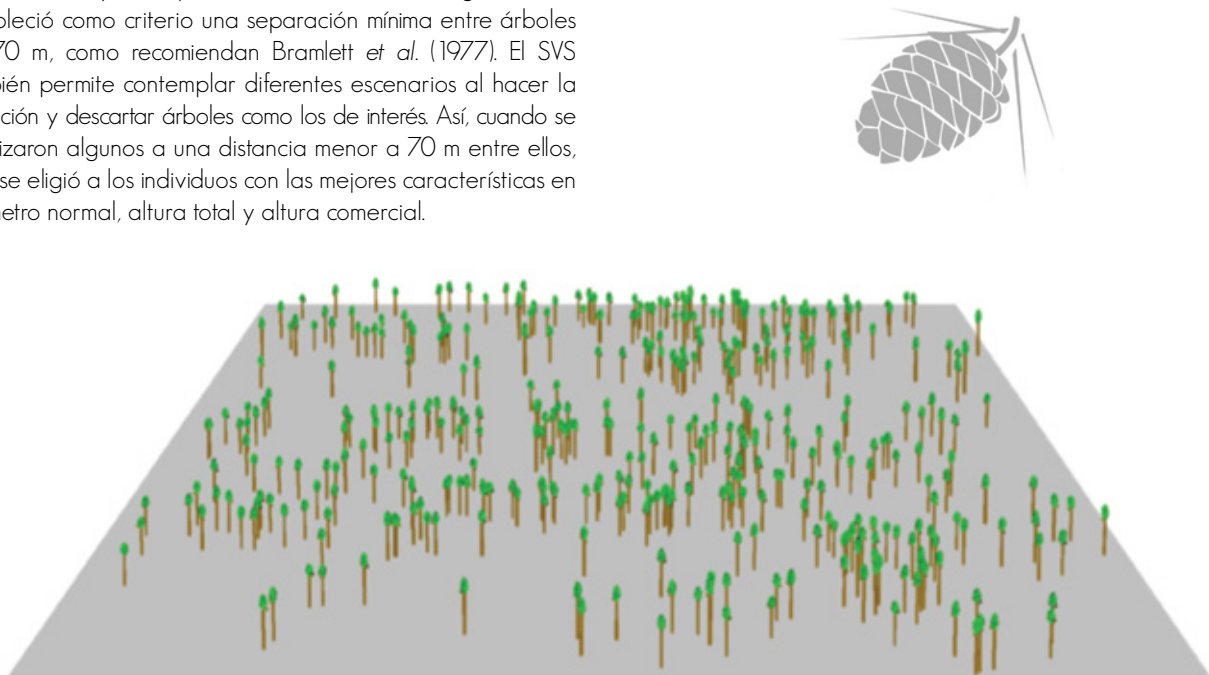


Figura 1. Rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México (50 ha).  
Figure 1. Natural mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, Mexico (50 ha).

En la selección de árboles es importante tener claro que la expresión fenotípica guarda una estrecha relación con el ambiente y el componente genético (dominancia y epistasia); los factores del primer tipo podrían ser muy intensos y en

In selecting trees it is important to be clear that the phenotypic expression has a close relationship to the environment and the genetic component (dominance and epistasis). The factors of the first type could be very intense and in some cases even

algunos casos aún confundirse con los segundos (Cruz, 2005). Lo anterior provoca dos tipos de errores: a) I, cuando se seleccionan individuos que no son genéticamente superiores; y b) II, cuando en un programa no se incluyen individuos que son genéticamente superiores al promedio poblacional (Murillo *et al.*, 2010), y también cuando no se eligen los individuos que a pesar de tener un menor diámetro normal su altura total alcanza el dosel superior (dominante) y la calidad de su fuste es excepcionalmente buena para la producción de madera (Murillo *et al.*, 2003).

La probabilidad de cometer el error de tipo I puede reducirse con la validación en campo de los árboles seleccionados y la eliminación de los seleccionados que en campo se ubican en ámbitos más productivos (que propicien un desarrollo más exitoso en comparación con el resto de los árboles). La probabilidad del error tipo II se puede disminuir al incorporar algunos del grupo intermedio como árboles sobresalientes que inicialmente no fueron catalogados como tales debido a que en campo estaban en condiciones ambientales limitantes (que no favorecen su plenitud), pero que presentan buenas características con respecto a la población general.

Estas consideraciones son fundamentales para el mejoramiento, ya que el error tipo I ocasiona un aumento de materiales indeseables en la población base y una disminución en el progreso genético; el error tipo II también causa una reducción potencial en la ganancia genética, ya que genotipos de alto valor no se incluyen en la población sujeta a manipulación.

Además de lo anterior, se hizo un análisis de correlación de Pearson entre las variables de importancia económica (altura total, diámetro normal, altura de fuste limpio y diámetro de copa), así como el cálculo de la media y del coeficiente de variación (CV) de la población base y de los árboles selectos. Para hacer una estimación del posible avance en la siguiente generación, similar al diferencial de selección (S) propuesto por White *et al.* (2007), se hizo una comparación entre medias de los 427 individuos y de los 30 árboles. Por último, con el valor del diferencial y con la desviación estándar de la población original se calculó la intensidad de selección (i), según Quijada (1980).

La ganancia genética (GG) esperada del diámetro normal y altura de los árboles seleccionados se estimó como sigue:

$$GG = S \times h^2,$$

Donde:

S = Diferencial de selección en %,

$h^2$  = Heredabilidad en sentido estricto (Murillo *et al.*, 2010)

confused with the latter (Cruz, 2005). The above causes two types of errors: a) I, when selecting individuals which are not genetically privileged; and b) II, when a program does not include individuals which are genetically higher than the population mean (Murillo *et al.*, 2010), and also when individuals are not chosen that, despite having a smaller normal diameter, their total height reaches the upper canopy (dominant) and the quality of its stem is exceptionally good for wood production (Murillo *et al.*, 2003).

The probability of committing the type I error can be reduced with field validation of the selected trees and the elimination of the selected ones that in the field are located in more productive areas (that lead to a more successful development compared to the rest of the trees). The probability of type II error can be reduced by incorporating some of the intermediate group as outstanding trees that were not initially classified as such due to the fact that in the field they were in limiting environmental conditions (which do not favor its fullness), but that they present good characteristics with respect to the general population.

These considerations are basic for improvement, since type I error causes an increase in undesirable materials in the base population and a decrease in the genetic progress; the type II error also causes a potential reduction in genetic gain, since high-value genotypes are not included in the population subject to manipulation.

In addition to the above, a Pearson correlation analysis was made between the variables of economic importance (total height, normal diameter, clean stem height and crown diameter), as well as the calculation of the mean and coefficient of variation (CV) Of the base population and select trees. To make an estimate of the possible advance in the next generation, similar to the selection differential (S) proposed by White *et al.* (2007), a comparison was made between averages of the 427 individuals and that of the 30 trees. Finally, with the value of the differential and the standard deviation of the original population, the intensity of selection (i) was calculated, according to Quijada (1980).

The expected genetic gain (GG) of the normal diameter and height of the selected trees was estimated as follows:

$$GG = S \times h^2,$$

Where:

S = Selection differential in %,

$h^2$  = Heritability in the strict sense (Murillo *et al.*, 2010)



Para estimar la ganancia genética esperada se utilizaron, los valores de heredabilidad de 0.54 para el diámetro y de 0.55 para la altura total y altura de fuste limpio calculados por Navarro y Hernández (2004).

## Resultados y Discusión

El análisis de componentes principales dio como resultado que el diámetro normal, la altura total y el diámetro de copa conducen más atinadamente a la selección de árboles sobresalientes, al representar 79.4 % de la varianza total con el primer componente principal (CP); además, aportaron una contribución relativa semejante para explicar la variación total (Cuadro 1); y para los efectos buscados, son las mejores porque presentaron lo más altos coeficientes de correlación, en comparación con las demás variables evaluadas (Cuadro 2).

Cuadro 1. Vectores Eigen de las variables utilizadas para selección de árboles candidatos de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

Variable	Componente principal (Varianza explicada)	
	1 (74.9 %)	2 (13.05 %)
Diámetro normal (cm)	0.59898	-0.03717
Altura total (m)	0.56836	-0.68394
Diámetro de copa (m)	0.56409	0.72858

Cuadro 2. Correlaciones de Pearson entre las variables utilizadas para selección de árboles candidatos de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

	Altura total (m)	Diámetro de copa (m)	Altura de fuste limpio (m)
Diámetro normal (cm)	0.7382**	0.7241**	0.4028**
Altura total (m)		0.6089**	0.5651**
Diámetro de copa (m)			0.2504**

\*\* Significativo con  $P < 0.0001$

El método de Ward Pseudo fue el que mejor agrupó a los árboles con el valor más alto del criterio cúbico de agrupamiento (CCA = 0.5), y con el de la pseudo F que fue igual a 1 156. De acuerdo con los valores asignados a los árboles por el ACP, se establecieron tres grupos. Los árboles del Grupo 1 mostraron cifras promedio más altas que las de los Grupos 2 y

In order to estimate the expected genetic gain, the values of heritability of 0.54 for the diameter and of 0.55 for the total height and height of the stem were calculated by Navarro and Hernández (2004).

## Results and Discussion

The Principal Component Analysis showed that normal diameter, total height and crown diameter lead more accurately to the selection of major trees, representing 79.4 % of the total variance with the first main component (CP); (Table 1), and for the effects sought, they are the best because they had the highest correlation coefficients, in comparison with the other assessed variables (Table 2).

Table 1. Eigen vectors of the variables used for the selection of candidate mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

Variable	Principal component (Explained Variance)	
	1 (74.9 %)	2 (13.05 %)
Normal diameter (cm)	0.59898	-0.03717
Total height (m)	0.56836	-0.68394
Crown diameter (m)	0.56409	0.72858

Table 2. Pearson's correlations between the variables used for the selection of candidate mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) trees in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

	Total height (m)	Crown diameter (m)	clean stem height (m)
Normal diameter (cm)	0.7382**	0.7241**	0.4028**
Total height (m)		0.6089**	0.5651**
Crown diameter (m)			0.2504**

\*\* Significant =  $P < 0.0001$

The Ward Pseudo method was the one that best grouped the trees with the highest value of the cubic criterion of grouping (CCA = 0.5), and with that of the pseudo F that was equal to 1 156. According to the values assigned to the trees by the GPA, three groups were established. The trees in Group 1 showed average values higher than those of Groups 2 and 3, in normal diameter (77.14 vs. 51.79 and 33.32 cm), total height (19.80 vs. 17.43 and 15.86 m) and crown diameter (12.44 vs. 9.61 and 6.25 m), respectively. Thus, this

3, en diámetro normal (77.14 vs. 51.79 y 33.32 cm), altura total (19.80 vs. 17.43 y 15.86 m) y diámetro de copa (12.44 vs. 9.61 y 6.25 m), respectivamente. Así, este conjunto quedó conformado por los 34 ejemplares más grandes, candidatos a ser elegidos como árboles selectos del total de 427 evaluados en el área de estudio.

Sin embargo, al efectuar un análisis espacial con apoyo del SVS para ver el escenario resultante con los 34 árboles escogidos, se observó que al aplicar el criterio de una distancia mínima de 70 m para evitar problemas de endogamia, la población base final sería muy pequeña e insuficiente para iniciar un programa de mejoramiento en esta especie. Por ello se decidió incluir a los mejores árboles del Grupo 2, para así tener un total de 46 candidatos. La selección de los ejemplares del Grupo 2 se hizo con base en su superioridad en altura total, y en menor grado en su diámetro normal, debido a que la altura tiene un efecto menor de la competencia o del ambiente de crecimiento, mientras que el segundo es altamente sensible a tales factores y, por lo general, registra valores de heredabilidad sumamente bajos (Murillo *et al.*, 2010).

La selección de árboles candidatos en el Grupo 2 no sólo se hizo para completar una base aceptable de árboles selectos, sino también para evitar cometer el error de tipo II al utilizar criterios muy estrictos. Los vectores Eigen del CP 1 mostraron que los integrantes de los grupos 1 y 2 tienen valores positivos y son elegibles. Caso contrario ocurrió en los árboles del Grupo 3 con vectores negativos, que los elimina como candidatos, por lo que la selección se restringió a los otros dos conjuntos (Figura 2). Los 46 árboles escogidos mediante ACP se identificaron en los datos del SVS (Figura 3); de ellos, al identificar los que cumplieran con una distancia mínima de 70 m se logró reunir a 30 árboles sobresalientes (Figura 4), lo que equivale aproximadamente a un árbol por cada 1.6 ha, que representan 7 % de la población inicial.

Al igual que Cerón y Sahagún (2005), Cerón *et al.* (2006), Cornejo *et al.* (2009) y Gutiérrez *et al.* (2010), en este estudio el primer componente fue el que mejor explicó la contribución de las variables en la variación total. Las destinadas para hacer la selección en este trabajo también han sido utilizadas para *Pinus radiata* D. Don (Mertens, 1983), *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (Salazar y Boshier, 1989) y *Pinus greggii* var. *greggii* (Cornejo *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010), pero en el trabajo que se aquí se describe, se consideró el menor número de variables posible, las cuales mostraron una correlación fenotípica positiva (Cuadro 3). Por lo anterior, no habría problema de ser estricto al aplicar la selección con base en un carácter puesto que no resultaría negativo para otro.

set was conformed by the 34 largest individuals, candidates to be chosen as selected trees from the total of 427 evaluated in the study area.

However, when performing a spatial analysis with SVS support to see the resulting scenario with the 34 chosen trees, it was observed that when applying the criterion of a minimum distance of 70 m to avoid problems of inbreeding, the final base population would be very small and not enough to start an improvement program in this species. Therefore, it was decided to include the best trees of Group 2, in order to have a total of 46 candidates. The selection of the trees of Group 2 was made based on their superiority in total height, and to a lesser degree on their normal diameter; This is because height has a lesser effect on competition or growth environment, whereas normal diameter is highly sensitive to competition and usually has extremely low heritability values (Murillo *et al.*, 2010).

The election of candidate trees in Group 2 was not only done to complete an acceptable base of select trees, but also to avoid making type II error by using very strict criteria. The Eigen vectors of CP 1 showed that the members of groups 1 and 2 have positive values and are eligible. Otherwise it occurred in the trees of Group 3 with negative vectors, which eliminated them as optional, so the sample was restricted to the other two sets (Figure 2). The 46 trees chosen by ACP were identified in the SVS data (Figure 3); from them, when identifying those that fulfilled with a minimum distance of 70 m, it was possible to gather 30 outstanding trees (Figure 4), which is equivalent to approximately one tree for each 1.6 ha, representing 7 % of the initial population.

Like Cerón and Sahagún (2005), Cerón *et al.* (2006), Cornejo *et al.* (2009) and Gutiérrez *et al.* (2010), in this study the first component explained in the best way the contribution of the variables in the total variation. Those taken for the selection in this work have also been used for *Pinus radiata* D. Don (Mertens, 1983), *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp. (Salazar and Boshier, 1989) and *Pinus greggii* var. *greggii* (Cornejo *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2010), but, in this paper, the lowest number of variables was considered, which showed a positive phenotypic correlation (Table 3). Therefore, it would not be a problem to be strict when applying the selection based on one character since it would not be negative for another.





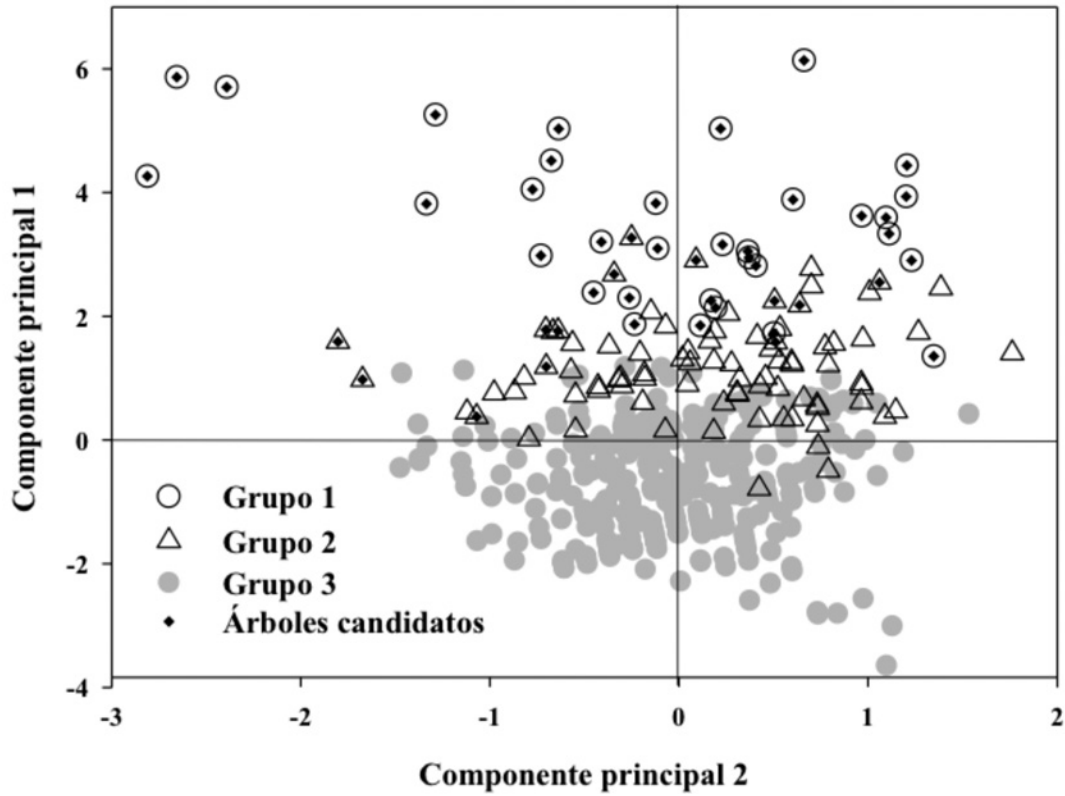


Figura 2. Agrupación de los árboles en los componentes principales 1 y 2 en un rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.  
Figure 2. Cluster of trees in the 1 and 2 principal components in a mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

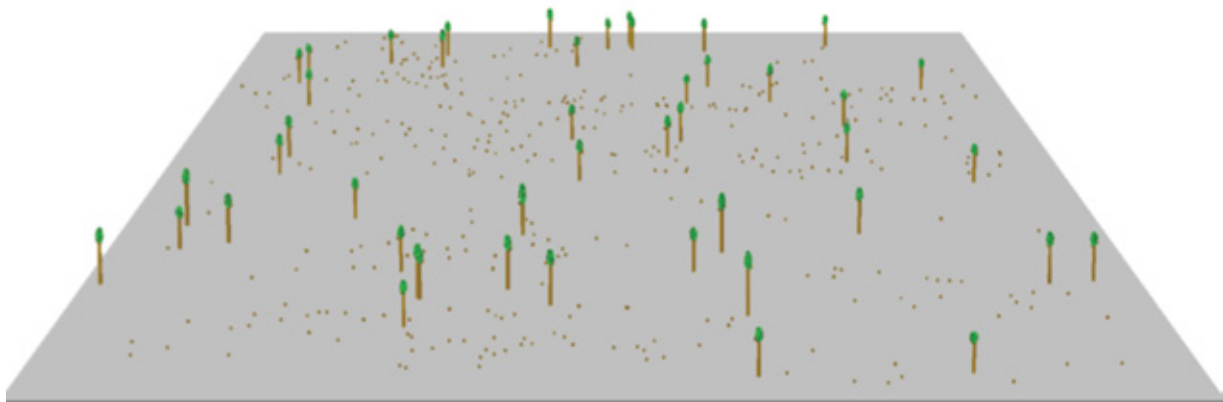


Figura 3. Árboles candidatos dentro del rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.  
Figure 3. Candidate trees in the mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.



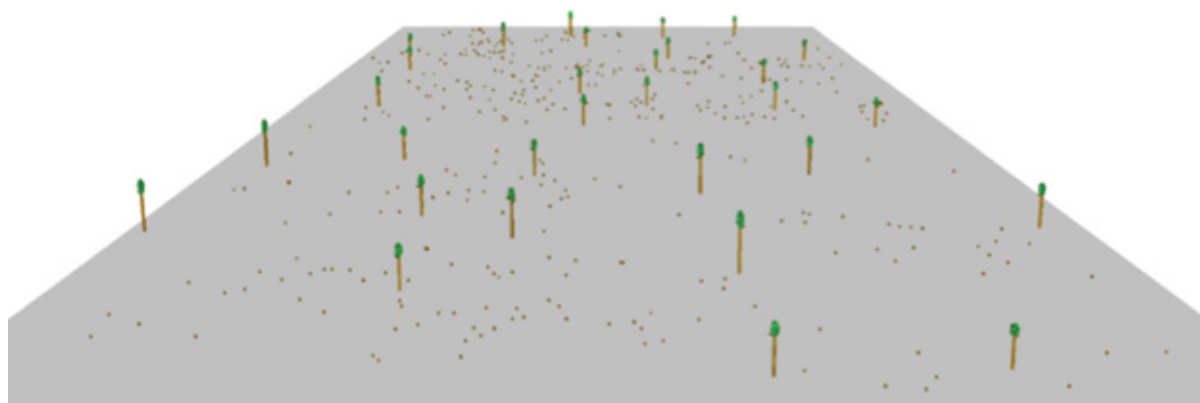


Figura 4. Árboles seleccionados dentro del rodal natural de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

Figure 4. Selected trees in the mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) natural stand in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

Cuadro 3. Características fenotípicas de la población base y la población selecta de caoba (*Swietenia macrophylla* King.), en Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo, México.

	Población base			Población selecta			S (%)	i
	Media	DE	CV (%)	Media	DE	CV (%)		
Diámetro normal (cm)	40.45	14.61	36.1	74.50	12.73	17.08	84	2.33
Altura total (m)	16.49	1.87	11.3	19.45	2.65	13.6	18	1.58
Altura de fuste limpio (m)	8.95	1.89	21.1	10.52	2.58	24.5	18	0.83
Diámetro de copa (m)	7.41	3.00	40.4	11.93	3.56	29.8	61	1.51

CV = Coeficiente de variación; DE = Desviación estándar; S = Diferencial de selección; i = Intensidad de selección.

Table 3. Phenotypic characteristics of the base population and selected mahogany (*Swietenia macrophylla* King.) population in Felipe Carrillo Puerto, Quintana Roo State, Mexico.

	Basic population			Selected population			S (%)	i
	Mean	DE	CV (%)	Mean	DE	CV (%)		
Normal diameter (cm)	40.45	14.61	36.1	74.50	12.73	17.08	84	2.33
Total height (m)	16.49	1.87	11.3	19.45	2.65	13.6	18	1.58
Clean stem height (m)	8.95	1.89	21.1	10.52	2.58	24.5	18	0.83
Crown diameter (m)	7.41	3.00	40.4	11.93	3.56	29.8	61	1.51

CV = Coefficient of variation; DE = Standard deviation; S = Selection differential; i = Selection intensity.

El número de árboles seleccionados afecta la base genética, pues si es reducido constituye una posibilidad estrecha que podría conducir rápidamente a problemas de endogamia. La decisión final de tal cantidad depende también de la variabilidad de los árboles selectos, de la productividad de semillas de cada individuo, y de las necesidades inmediatas de semillas tanto en cantidad como en calidad (Ledig, 1974; Quijada, 1980). Entre menos prolixa sea una especie en producción de semillas, mayor número de individuos será necesario para cubrir las metas de producción de planta. Los 30 árboles aquí seleccionados se consideran suficientes para un programa

The number of selected trees affects the genetic base, because if it is small there is a narrow possibility that could lead to problems of inbreeding. The final decision of such an amount also depends on the variability of the selected trees, on the seed productivity of each individual, and on the immediate needs for seeds in both quantity and quality (Ledig, 1974; Quijada, 1980). The less prolific a species is in seed production, the greater number of individuals will be required to meet plant production goals. The 30 trees selected here are considered enough for a small breeding program (López, 2006), which is close to the assumption of Zobel and Talbert (1988) who considered that

pequeño de mejoramiento (López, 2006), lo que es cercano al supuesto de Zobel y Talbert (1988) quienes consideraron que 20 árboles superiores es una proporción correcta para el establecimiento de huertos semilleros.

El diámetro normal presentó la mayor irregularidad en la población base, de acuerdo con las desviaciones estándar y el coeficiente de variación, mientras que el diámetro de copa lo fue en la población selecta. La primera disminuyó considerablemente en este grupo respecto al diámetro normal y de copa; en cambio, la altura total y de fuste limpio registraron un ligero aumento en los árboles sobresalientes (Cuadro 3). El diferencial de selección para las características de interés económico indica valores positivos; destacan el diámetro normal con el mayor valor, que corresponde a 84 % de la población base, le sigue el diámetro de copa con 61 %. En la altura total y de fuste limpio los valores fueron bajos pues sólo representaron 17 % de la población base.

Con respecto a la ganancia genética estimada se calculó que el diámetro normal sería 45.36 % superior en la nueva generación con relación a la parental (árboles seleccionados). En la altura total y fuste limpio, la siguiente generación sólo sería superior en 9.9 %. El valor para diámetro normal coincide con los datos publicados por Cornelius (1994) con base en el análisis de 24 trabajos sobre la efectividad de la selección de árboles en programas de mejoramiento genético, en los que registró que la ventaja genética reportada y obtenida al utilizar material superior es mayor a 15 % para crecimiento en altura y en diámetro normal, mientras que en altura total y altura de fuste limpio determinó cifras más altas que las aquí calculadas. Las del presente estudio son conservadoras, ya que el cálculo se hizo solo a partir de la reproducción sexual por medio de las semillas de los ejemplares seleccionados; sin embargo, si la reproducción fuera asexual (clonación), las ganancias serían mayores.

El mayor valor de intensidad de selección aquí estimado fue para el diámetro normal con 2.33; la altura total y el diámetro de copa alcanzaron valores medios de 1.58 y 1.51; y la altura de fuste limpio, el menor valor de intensidad de selección (Cuadro 3). Este concepto fue equivalente a dos desviaciones estándar en el diámetro normal, lo que muestra que puede lograrse una ganancia amplia en esta característica mediante la elección de los mejores fenotipos de la población. Según Wright (1976), un diferencial de dos a tres desviaciones estándar es realista cuando se practica en bosques naturales. La intensidad de selección indica en qué medida son fenotípicamente mejores los árboles superiores con respecto a la población original de donde fueron tomados (Zobel y Talbert, 1988).

20 upper trees is a correct proportion for the establishment of seed orchards.

The normal diameter showed the highest irregularity in the base population, according to the standard deviations and the coefficient of variation, while the crown diameter occurred in this group with respect to normal and crown diameter; on the other hand, the total height and the clean stem exhibited a slight increase in the major trees (Table 3). The selection differential for the characteristics of economic interest indicates positive values; normal diameter with the highest value, corresponding to 84 % of the base population, is followed by the cup diameter with 61 %. In the total height and clean stem, the numbers were low because they represented only 17 % of the base population.

Regarding the estimated genetic gain, it was estimated that the normal diameter would be 45.36 % higher in the new generation relative to the parent (selected trees). At full height and clean stem, the next generation would only be 9.9 % higher. The value for normal diameter coincides with the data published by Cornelius (1994) based on the analysis of 24 works on the effectiveness of the selection of trees in breeding programs, in which he recorded that the genetic advantage reported and obtained when using better material is greater than 15 % for growth in height and normal diameter, while in total height and height of clean stem determined higher figures than those calculated here. Those of the present study are conservative, since the calculation was made only from the sexual reproduction by means of the seeds of the selected individuals; however, if reproduction were asexual (cloning), the gains would be greater.

The highest value of selection intensity here was for the normal diameter with 2.33; Total height and cup diameter reached mean values of 1.58 and 1.51; And the clean stem height, the lowest selection intensity value (Table 3). This concept was equivalent to two standard deviations in normal diameter, which shows that a broad gain in this characteristic can be achieved by choosing the best phenotypes of the population. According to Wright (1976), a differential of two to three standard deviations is realistic when practiced in natural forests. The intensity of selection indicates to what extent the superior trees are phenotypically better with respect to the original population from where they were taken (Zobel and Talbert, 1988).



## Conclusiones

Los análisis de componentes principales (ACP) y de agrupamiento permitieron seleccionar los mejores 30 árboles, cuya superioridad sobre la población base fue de 34 cm en diámetro normal, de 2.9 m en altura total y de 1.5 m en altura comercial. El método basado en análisis multivariados es conveniente porque es sencillo, proporciona un soporte estadístico a los programas de mejoramiento genético forestal porque favorece la presencia de características múltiples. La selección resultó efectiva porque los árboles elegidos por el ACP fueron los mejores en campo. Los resultados hacen recomendable el método planteado porque el objetivo se alcanzó satisfactoriamente y estima el valor porcentual de ganancia genética esperada, aunque debe tomarse en cuenta que existe una tendencia a subestimar o sobreestimar los verdaderos valores.

La selección por medio de ACP y del agrupamiento se fortalece con el uso del programa SVS que hace posible el manejo espacial de los árboles y de los diferentes escenarios en la selección de árboles, lo que supone que esta información es trascendente en la toma de decisiones en lo que compete a los árboles tropicales.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

## Contribución por autor

Benito N. Gutiérrez Vázquez: análisis de los datos de campo, redacción, estructura y presentación de los resultados dentro del documento; Eladio H. Cornejo Oviedo: análisis de la información de campo, evaluación del análisis estadístico, y revisión del documento; Bartolo Rodríguez Santiago: planeación, diseño y supervisión de trabajo de campo, revisor del documento y análisis de la aplicación de los resultados; Javier López Upton: análisis de la aplicación de los resultados y revisión del documento; Mario H. Gutiérrez Vázquez: evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo, evaluación y apoyo en el ajuste estadístico; Martín Gómez Cárdenas: evaluación de la aplicabilidad de la información obtenida en campo y revisión del documento; Amelia Flores Montaña: análisis de la aplicación de los resultados y revisión del documento.

## Referencias

- Bramlett, D. L., E. W. Belcher Jr., G. I. DeBarr, J. L. Hertel, R. P. Karrfalt, C. W. Lantz, T. Miller, K. D. Ware and H. O. Yates III. 1977. Cone analysis of Southern pines: a guidebook. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. SE-13. Asheville, NC, USA. 28 p.
- Brown, C. L. and R. E. Goddard. 1961. Silvicultural consideration in the selection of plus tree phenotypes. *Journal of Forestry* 59: 420-426.
- Cerón R., J. J. y J. Sahagún C. 2005. Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia* 39: 667-677.
- Cerón R., J. J., J. Crossa, J. Sahagún C., F. Castillo G. and A. Santacruz V. 2006. A selection index method based on Eigen analysis. *Crop Science* 46: 1711-1721.
- Cornelius, J. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. *Forest Ecology and Management* 67:23-34.

## Conclusions

Principal component analysis (PCA) and cluster analysis allowed the selection of the best 30 trees, whose superiority over the base population was 34 cm in normal diameter, 2.9 m in total height and 1.5 m in commercial height. The method based on multivariate analysis is convenient because it is simple, it provides statistical support to forest breeding programs because it favors the presence of multiple characteristics. The selection was effective because the trees chosen by the PCA were the best in the field. The results make the proposed method recommendable because the objective was reached satisfactorily and estimates the percentage value of expected genetic gain, although it should be taken into account that there is a tendency to underestimate or overestimate the true values.

The selection through PCA and clustering is strengthened by the use of the SVS program that makes possible the spatial management of trees and the different scenarios in the selection of trees, which means that this information is important in decision making as far as tropical trees are concerned.

## Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

## Contribution by autor

Benito N. Gutiérrez Vázquez: analysis of field data, writing, structure and presentation of results in the manuscript; Eladio H. Cornejo Oviedo: analysis of field data, assessment of the statistical analysis and review of the document; Bartolo Rodríguez Santiago: planning, design and supervisions of field work, review of the document and analysis of the application of results; Javier López Upton: analysis of the application of results and review of the document; Mario H. Gutiérrez Vázquez: assessment of the applicability of field work data, assessment and support in statistical fit; Martín Gómez Cárdenas: assessment of the applicability of field work data and review of the document; Amelia Flores Montaña: analysis of the application of results and review of the document.

*End of the English versión*



- Cornejo O., E. H., E. Bucio Z., B. Gutiérrez V., S. Valencia M. y C. Flores L. 2009. Selección de árboles y conversión de un ensayo de procedencias a un rodal semillero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32: 87-92.
- Cruz C., D. 2005. Principios de genética cuantitativa. Universidad Federal de Vicosa. Vicosa, Minas Gerais, Brasil. 394 p.
- Gutiérrez V., B., E. H. Cornejo O., A. Zermeño G., S. Valencia M. y R. Mendoza V. 2010. Conversión de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *greggii* a huerto semillero mediante Eigen-análisis. *Bosque* 31:45-52.
- Ledig, F. T. 1974. Analysis of methods for the selection of trees from wild stand. *Forest Science* 20:2-16.

- López U., J. 2006. Consideraciones en el manejo de germoplasma forestal. In: Ruiz T., N. A. (ed.). Producción y Conservación de Semillas Forestales. XIII Curso Internacional de Actualización en Tecnología de Semillas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coah., México. pp. 66-72.
- Maldonado B., E. y M. L. Escobar M. 2000. Selección de árboles plus de frijolito (*Schizolobium parahybum*) para mejorar genéticamente la especie en Santander-Colombia. In: Salazar, R. (ed.). 2do. Simposio de Avances en la Producción de Semillas Forestales en América Latina. Turrialba, Costa Rica. pp. 39-45.
- McGaughey, R. J. 1997. Visualizing forest stand dynamics using the Stand Visualization System. Proc. ACSM/ASPRS 4:248-257.
- McGaughey, R. J. 1999. Stand Visualization System. <http://faculty.washington.edu/mcgoy> (30 de abril de 2011).
- Mertens, P. 1983. Criterios de selección de *P. radiata* D. para árboles y rodales semilleros. CICAFOR, INFF y CTB. Cajamarca, Perú. 27 p.
- Murillo, O., J. L. Rojas y Y. Badilla. 2003. Reforestación clonal. 2a ed. Taller de Publicaciones. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 36 p.
- Murillo, O., F. Picado, Y. Badilla y J. Vallejos. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. Revista de Agronomía Costarricense 34:105-119.
- Navarro, C. and G. Hernández. 2004. Progeny test analysis and population differentiation of Mesoamerican mahogany (*Swietenia macrophylla*). Revista de Agronomía Costarricense 28:37-51.
- Quijada, M. 1980. Selección de árboles forestales. In: Mejora genética de árboles forestales; curso de capacitación FAO/DANIDA sobre la mejora genética de árboles forestales. FAO. Departamento de Montes. Mérida, Venezuela. Núm. 20. pp.169-179.
- Salazar, R. y D. Boshier. 1989. Establecimiento y manejo de rodales semilleros de especies forestales prioritarias en América Central. CATE-ROCAP. Serie Técnica No. 148. Turrialba, Costa Rica. 78 p.
- Stonecypher, R. W. 1970. Mejoramiento forestal de caracteres múltiples. Unasylva 24:48-51.
- Statistical Analysis System Institute (SAS).1999. SAS/STAT Guide for personal computers. Version 6. Cary, NC, USA. 518 p.
- Torres, J. 2000. Evaluación genética y económica de dos ensayos de progenie de *Pinus radiata* D. Don a base de un índice de selección multicriterio. Universidad de Chile. Revista Ciencias Forestales 14:1-7.
- White, T. L., T. W. Adams and D. B. Neale. 2007. Forest genetics. CABI Publishing, Cambridge, MA, USA. 682 p.
- Wright, J. W. 1964. Mejoramiento genético de los árboles forestales. FAO. Roma, Italia. 436 p.
- Wright, J. W. 1976. Introduction to forest genetics. Academic Press. New York, NY, USA. 463 p.
- Zobel, B. J. y J. T. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México, D. F., México. 545 p.





