

Variación morfométrica en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. del estado de Veracruz

Morphometric variation in two natural populations of *Pinus hartwegii* Lindl. at Veracruz State

Iglesias LG¹, LY Solís-Ramos², H Viveros-Viveros³

Resumen. Se evaluó la variación morfométrica de conos, semillas y acículas en dos poblaciones de *Pinus hartwegii* del estado de Veracruz, con la finalidad de estimar el porcentaje de la variación fenotípica debido a diferencias entre poblaciones y árboles dentro de las poblaciones. Además se llevó a cabo un análisis multivariado de componentes principales, de conglomerado y discriminante, para caracterizar las poblaciones. Se constató que la mayoría de las características evaluadas de conos, semillas y acículas mostraron variación significativa tanto entre poblaciones como entre árboles dentro de las poblaciones. Las mediciones de caracteres de semillas usadas como indicadores del estado genético y reproductivo de dos poblaciones naturales de *P. hartwegii* revelaron que gran parte de la variación detectada se encontró principalmente entre árboles dentro de las poblaciones. Los caracteres de conos mostraron que la varianza se distribuyó tanto entre poblaciones como dentro de poblaciones. Los caracteres foliares mostraron mayor porcentaje de variación atribuido a la población que entre árboles dentro de las poblaciones, lo que indica que estos caracteres están fuertemente influenciados por el ambiente. Los resultados del análisis de componentes principales y de conglomerado no permitieron diferenciar claramente a las dos poblaciones. La variable discriminatoria más importante entre poblaciones fue la longitud del cono y sobre esta base se obtuvo una efectividad del 70% en la clasificación de los árboles de ambas poblaciones. Los resultados en conjunto concuerdan en que existe poca diferenciación en los caracteres morfológicos entre las poblaciones examinadas ya que la mayor detectada fue intrapoblacional.

Palabras clave: Variación morfométrica; Poblaciones; *Pinus hartwegii*; Coníferas.

Abstract. The morphometric variation of cones, seeds and needles was evaluated in two natural populations of *Pinus hartwegii* at Veracruz state to estimate the percentage of phenotypic variation due to differences among populations and trees within populations. In addition, multivariate principal components, cluster and discriminate analysis was conducted to characterize the populations. Most of the traits measured on cones, seeds and needles showed significant variation both among populations and among trees within populations. Measurements of cone and seed traits used as indicators of the genetic and reproductive status of two natural populations of *P. hartwegii* revealed that much of the variation was mainly detected among trees within populations. Cone characters showed that the variance distributed both among and within populations. Leaf traits showed a greater percentage of variation among than within tree populations, indicating that these traits are strongly influenced by the environment. Results from the principal component and cluster analysis did not allow to differentiate clearly both populations. The most important discriminatory variable between populations was the cone length; an efficiency of 70% in the classification of the trees from both populations was obtained on this basis. The overall results agree that there is little differentiation in morphological characters among the examined populations, and that most of the variation was detected within populations.

Keywords: Morphometric variation; Populations; *Pinus hartwegii*; Conifers.

¹ Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (INBIOTECA), Universidad Veracruzana, V. de las Culturas Veracruzanas No. 101, Campus para la Cultura, las Artes y el Deporte, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 91090 Xalapa, Veracruz, México. Tel.: (228) 8 42 27 73.

² Biotecnología y Transformación Genética de Plantas, Escuela de Biología, Universidad de Costa Rica. P.O. Box 11501-2060, San Pedro, Costa Rica. Tel.: (506) 25115091 y Fax. (506) 25114216.

³ Instituto de Investigaciones Forestales (INIFOR), Universidad Veracruzana, Parque Ecológico "El Haya", Col. Benito Juárez, C.P. 91070, A.P. 551, Tel. / Fax (228) 8 42 17 00 Ext. 13964, Xalapa, Ver., México, e-mail: heviveros@hotmail.com

Address Correspondence to: Lourdes G. Iglesias, e-mail: liglesias@uv.mx

Recibido / Received 17.III.2011. Aceptado / Accepted 14.X.2011.

INTRODUCCIÓN

Los bosques poco densos y monoespecíficos en su estrato arbóreo que conforma las poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl. del Parque Nacional Cofre de Perote y Pico de Orizaba, ubicadas entre los 3200 y 4000 msnm, poseen un gran valor ecológico y socioeconómico. Musálem y Solís (2000) informaron que las poblaciones de esta especie a las mayores elevaciones sobre el nivel del mar, cumplen funciones de protección a otros recursos y amortiguan los efectos de contaminación ambiental. Además, como reguladores del ciclo hidrológico producto del deshielo de los volcanes, contribuyen al abastecimiento de agua a los mantos freáticos. Estos hechos son posibles debido en parte a la alta tolerancia de *P. hartwegii* a las bajas temperaturas (Viveros-Viveros et al., 2007, 2009). Esto último le permite constituir el límite altitudinal de la vegetación arbórea de alta montaña (Lauer, 1973, 1978). Por otra parte, los bosques de esta especie resultan una fuente importante en el proceso de transformación de la madera, como lo son la producción de celulosa y papel. Esto representa una importante fuente de ingresos monetarios tanto para los industriales encargados del proceso de transformación, como para los poseedores del recurso bosque, para quienes también representa una fuente de empleo (Musálem y Solís, 2000).

Las localidades de "Cofre de Perote" y "Pico de Orizaba" (en el estado de Veracruz), sin embargo, fueron seriamente afectadas. Esto se debió al bajo porcentaje de germinación (menor de un 10%) y el elevado número de semillas vacías (>50%) en dichas poblaciones (Solís, 2002; Iglesias et al., 2006). Esto parece constituir manifestaciones del fenómeno de depresión endogámica a nivel embrional, bastante común en especies de coníferas (Williams y Savolainen, 1996; Remington y O'Malley, 2000). Todo ello está ocasionando una sensible disminución en la producción y calidad de las semillas de estas poblaciones (Iglesias et al., 1999). Además, *P. hartwegii* es una especie altamente vulnerable al calentamiento global por su distribución altitudinal única y extrema; se espera que su área de distribución actual disminuya entre un 41 y 49% (Arriaga y Gómez, 2004; Villers y Trejo, 2004), y que se pierdan las poblaciones localizadas en las mayores elevaciones (Viveros-Viveros et al., 2009; Sáenz-Romero et al., 2010).

Para México y en particular para el estado de Veracruz, resulta prioritario disponer de información precisa sobre la variación morfométrica existente en las poblaciones naturales de *P. hartwegii* de Pico de Orizaba y del Cofre de Perote. Estudios previos realizados de manera independiente en estas poblaciones han mostrado la existencia de una amplia variabilidad morfológica y bioquímica (Solís, 2002; Iglesias y Tivo, 2006, 2008; Iglesias et al. 2006; Iglesias y Luna, 2008), en aspectos ecológicos, y de calidad de su madera (Pérez-Rodríguez y Eguiluz-Piedra, 1985; Bonilla, 1993; Musálem y Solís, 2000) entre las mismas. Más recientemente se ha determinado

la variación altitudinal en caracteres del crecimiento en esta especie (Viveros-Viveros et al., 2009, 2010).

Los objetivos de este trabajo fueron (1) determinar la variación existente en diversos caracteres morfométricos (acículas, conos y semillas) en las dos poblaciones de *Pinus hartwegii*; (2) estimar el porcentaje de la variación fenotípica debido a diferencias entre poblaciones y entre árboles dentro de una misma población, y (3) determinar la efectividad del análisis discriminante para reconocer los árboles de cada población. Estos estudios contribuirían al desarrollo de estrategias apropiadas de conservación, manejo y uso de estos importantes recursos forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización geográfica de las poblaciones en estudio. Se examinaron dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl., dentro de su rango de distribución natural en México. La población del "Cofre de Perote" se encuentra ubicada a los 19° 15' N, 97° O, mientras que la población del "Pico de Orizaba" se sitúa a los 19° 01' N, 97° 15' O (Servicio Meteorológico Nacional, 1984).

Colecta del material vegetal. Primeramente se realizó un recorrido por cada una de las poblaciones de pinos en estudio, y luego se seleccionó una muestra conformada por 24-30 árboles. El tamaño de la muestra se encuentra entre las cifras recomendadas por Callaham (1964) para cuando no se conoce la variación fenotípica de los árboles. Como criterio de selección se incluyeron en la muestra árboles sanos, que presentasen conos con apariencia sana, y que se encontrasen espaciados a una distancia mayor de 50 m; esto último se efectuó para evitar el efecto de coancestría. De la parte media de cada copa de árbol se colectaron 30 conos cerrados, y se tomaron al azar muestras vegetativas de fascículos.

Caracteres morfométricos evaluados. Caracteres foliares. Se tomó una muestra de 30 fascículos al azar de cada árbol en estudio. Se evaluaron los siguientes caracteres por árbol: longitud del fascículo (**LF**), longitud de las acículas mayor (**LAM**) y menor (**LAME**), y longitud del braquiblasto (**LB**).

Caracteres del cono. Se tomó una muestra aleatoria de 10 conos por árbol, y en cada cono se evaluaron las siguientes características: peso (**PC**), largo (**LC**), ancho de la base (**ABC**) y ancho del ápice (**AAC**). El peso de los conos se determinó de manera individual con una balanza analítica (marca Ohaus) con una precisión de 0,01 g. La longitud y el ancho de los conos se midieron con un vernier (marca Scala) con una precisión de 0,1 mm.

Caracteres de la semilla. De cada cono evaluado se tomaron 10 semillas de la parte central, y con un vernier marca Scala (pre-

cisión de 0,1 mm) se midieron las siguientes características: largo (LS) y grosor (GS). Se determinó el peso de cada semilla (PS) con una balanza analítica, marca Ohaus (precisión de 0,01 g).

Análisis estadísticos. Para caracterizar la variación entre y dentro de las poblaciones se realizaron análisis de varianza (ANOVA), y análisis de componentes de varianza, entre las diversas características morfométricas (foliares, conos y semillas) evaluadas. Los análisis de varianza se ajustaron a un modelo anidado de efectos mixtos (donde sitio es un efecto fijo y los demás factores son aleatorios) de acuerdo con el programa STATISTICA (versión 2000). El modelo utilizado para las características de fascículos y conos fue:

$$Y_{ij} = \mu + \text{Sitio}_i + \text{Árbol (Sitio)}_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Mientras que para las semillas fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \text{Sitio}_i + \text{Árbol (Sitio)}_{ij} + \text{Conos (Árbol)}_{ijk} + \epsilon_{ijk}$$

Los componentes de varianzas se estimaron según un modelo aleatorio (Steel y Torrie, 1988). Para describir la variación en ambas poblaciones se utilizaron métodos de ordenamiento multivariados. Para ello se estandarizaron las variables mediante la transformación $\log_{10}(x)$ previo a la realización del Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre una matriz de correlaciones, con el fin de reducir el número de variables. Sobre esta base, se seleccionaron solo aquellas variables que ejercieron una mayor contribución a la variación detectada para efectuar un análisis de conglomerado jerárquico y un análisis factorial discriminante. Para el análisis de conglomerado, se empleó como índice de similitud la distancia euclidiana y el algoritmo de ligamiento de Ward, que calcula la varianza dentro de los conglomerados y la minimiza. Se realizó un análisis discriminante con el fin de obtener un menor número de variables o de componentes de la variación total

que pudiesen ayudar a discriminar a las dos poblaciones en estudio, y ubicar a los nuevos individuos en el grupo correcto, con una probabilidad mínima de clasificación errónea. Las diferencias entre los individuos de ambas poblaciones se evaluaron a través de estadísticos específicos como la lambda de Wilks y la distancia D^2 de Mahalanobis (Rao, 1952).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de la variación de los caracteres foliares. El largo promedio de la acícula mayor fue de $8,6 \pm 1,61$ cm (Tabla 1). Estos valores resultan menores a lo reportado por Niniz (2005) para la especie en la población de Pico de Tancítaro en Michoacán, México. Este autor informó valores de 11 a 16 cm para esta característica. El largo promedio de la acícula menor fue de $8,5 \pm 1,61$ cm (Tabla 1). Las longitudes de las acículas mayor y menor están en el rango señalado por Martínez (1948) y Farjon y Styles (1997) para la especie (de 5 a 22 cm). Por otra parte, el largo promedio del braquiblasto fue de $1,3 \pm 0,63$ cm, y la longitud promedio de fascículo fue de $9,9 \pm 1,56$ cm (Tabla 1). Las poblaciones en estudio mostraron diferencias significativas para todos los caracteres foliares examinados (Tabla 1). Estos resultados coinciden con lo encontrado por Niniz (2005) al analizar diversos caracteres foliares de la población de esta especie en Pico de Tancítaro, Michoacán, México. Para la variable longitud del braquiblasto solo se detectaron diferencias a nivel de árboles dentro de poblaciones (Tabla 1). Las diferencias entre las dos poblaciones explicaron entre 9,4 y 15,9% de la variación total observada para las variables longitud del braquiblasto y del fascículo, respectivamente (Tabla 1).

Análisis de la variación de los caracteres de conos. Hubo diferencias significativas para todos los caracteres de conos

evaluados a nivel de población, y de árbol dentro de población en los análisis de varianzas efectuados (Tabla 2). El peso del cono promedio fue de $40,01 \pm 14,41$ g (Tabla 2), valor cercano a los 54,19 g que informaron Musálem y Solís (2000) para la especie. La longitud promedio de cono fue de $7,82 \pm 1,1$ cm (Tabla 2). Este valor es menor al reportado por Niniz (2005) en *P. hartwegii* del Pico de Tancítaro, Mich. (valores entre 8,3 y 11 cm). Sin embargo está dentro del rango determinado para la especie por Martínez (1948), Farjon y Styles (1997)

Tabla 1. Variación morfométrica y componentes de varianza de los caracteres foliares evaluados en dos poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl.

Table 1. Morphometric variation and variance components of leaf traits evaluated in two populations of *Pinus hartwegii* Lindl.

Fuente de Variación	Caracteres foliares							
	LAM	% V	LAME	% V	LB	%V	LF	%V
Población	19,284*	11,5	20,068*	11,9	2,473*	9,4	25,236*	15,9
Árbol (Población)	1,841 ^{ns}	0,0	1,747 ^{ns}	0,0	0,629*	0,9	2,037 ^{ns}	0,0
Error	2,589	88,5	2,594	88,1	0,398	89,7	2,427	84,1
$\bar{X} \pm ES$	8,6±1,61		8,5±1,61		1,3±0,63		9,9±1,56	

LAM = Largo de la acícula mayor; LAME = Largo de la acícula menor; LB = Largo del braquiblasto; LF = Longitud del fascículo; ES = Error estándar; (*) = Significativo $p \leq 0,05$; ns: No significativo; % V = Porcentaje de variación.

LAM = Length of the longest needle; LAME = Length of the smallest needle; LB = Length of the brachyblast; LF = Fascicle length; ES = Standard error; * = Significant at $p \leq 0,05$; ns = Not significant; %V = Variation percentage.

y Perry (1991) (de 7 a 14 cm). El ancho de la base del cono promedio fue de $3,86 \pm 0,61$ cm, y el ancho promedio del ápice del cono fue de $1,90 \pm 0,41$ cm (Tabla 2). Niniz (2005) informó un ancho de cono que varió entre 3,4 y 4,0 cm.

De acuerdo con estos resultados se observó un mayor componente de variación entre árboles dentro de poblaciones para los caracteres Peso y Ancho de la base del cono. Se ha indicado que características como longitud de los conos se encuentran bajo un control genético relativamente elevado (Stoehr y Farmer, 1986). En particular, la variable longitud de los conos fue la que presentó el mayor porcentaje de variación entre poblaciones.

Análisis de la variación de los caracteres de semilla. La longitud promedio de la semilla fue de $4,9 \pm 0,04$ mm (Tabla 3), valor muy cercano al rango reportado para la especie de 5 a 7 mm (Martínez, 1948; Perry, 1991; Niniz, 2005). El ancho promedio de la semilla fue de $3,36 \pm 0,03$ mm (Tabla 3), valor

cercano al rango encontrado por Niniz (2005) (de 3,7 a 4,5 mm) para la especie en la población del Parque Nacional "Pico de Tancitaro" en Michoacán. Sin embargo, a excepción del ancho de la semilla todos los caracteres evaluados resultaron significativos a nivel de conos, árboles y población (Tabla 3). Algunos autores han indicado que algunas características de las semillas en *Pinus* se encuentran muy influidas por factores ambientales tales como temperatura, humedad y pH (Borghetti et al., 1989; Reyes y Casals, 2002).

Análisis integral. Los resultados del análisis de componentes principales efectuado a la matriz de datos morfológicos determinadas por las 11 variables morfométricas revelaron que los tres primeros componentes explicaron el 62,5% de la variación en los datos, lo que indica que se trata de una ordenación confiable (Tabla 4).

El análisis de la contribución de las variables evaluadas a

la formación de los tres primeros componentes mostró que las variables asociadas con las características foliares: LAM, LAME y LF fueron las que más contribuyeron a la formación del primer componente. El segundo componente explicó el 16,7% de la varianza total. Las variables con mayor peso a la formación del segundo componente fueron las variables asociadas en su mayoría a los caracteres del cono (LC, PC y LS). Las variables asociadas con la semilla como PS y GS fueron las que más contribuyeron a la formación del tercer componente (Tabla 5), que explicó el 14,4% de la varianza total.

En la Figura 1 se puede apreciar la distribución espacial de las variables examinadas en el plano conformadas por los dos primeros componentes, que fueron las que explicaron el mayor porcentaje (47,5%) de la variación detectada. La distribución espacial de los árboles de ambas poblaciones en base a dichos dos primeros componentes conformaron cuatro grupos (Fig. 2). Los grupos (I y IV)

Tabla 2. Variación morfométrica y componentes de varianza de los caracteres foliares evaluados en dos poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl.

Table 2. Morphometric variation and variance components of leaf traits evaluated in two populations of *Pinus hartwegii* Lindl.

Fuente de variación	Caracteres de conos							
	PC	% V	LC	% V	ABC	%V	AAC	%V
Población	19674,01*	24,2	149,692*	31,7	20,484*	16,6	17,303*	28,9
Árbol (Población)	2062,68*	26,7	8,794*	18,8	2,975*	24,9	0,957*	15,4
Error	207,76	49,1	1,208	49,5	0,373	58,6	0,172	55,7
$\bar{X} \pm ES$	40,01 \pm 14,41		7,82 \pm 1,1		3,86 \pm 0,61		1,90 \pm 0,41	

PC = Peso cono; LC = Largo cono; ABC = Ancho de la base del cono; AAC = Ancho ápice del cono; ES = Error estándar; * = Significativo $p \leq 0,05$; %V = Porcentaje de variación.

PC = Cone weight; LC = Cone length; ABC = Width of the cone base; AAC = Width at the top portion of the cone; ES = Standard error; * = Significant at $p \leq 0,05$; %V = Variation percentage.

Tabla 3. Variación morfométrica y componentes de la varianza para las características de las semillas evaluadas en dos poblaciones de *Pinus hartwegii* Lindl.

Table 3. Morphometric variation and variance components of seeds traits evaluated in two populations of *Pinus hartwegii* Lindl.

Fuente de Variación	Caracteres de la semilla					
	PS	% V	GS	% V	LS	%V
Población	0,001*	1,3	0,021*	6,8	0,077*	6,6
Árbol (Población)	0,010*	38,8	0,020*	19,2	0,101*	25,8
Cono	0,004*	28,9	0,004*	5,4	0,015*	6,2
Error	0,0001	31,0	0,001	68,7	0,002	61,4
$\bar{X} \pm ES$	0,021 \pm 0,008		0,230 \pm 0,03		0,490 \pm 0,04	

PS = Peso de la semilla; GS = Grosor de la semilla; AS = Ancho de la semilla; LS = Largo de la semilla; ES = Error estándar; * = Significativo $p \leq 0,05$; ns= No significativo; % V= Porcentaje de variación.

PS = Seed weight; GS = Seed thickness; AS = Seed width; LS = Seed length; ES = Standard error; * = Significant at $p \leq 0,05$; %V = Variation percentage.

Tabla 4. Matriz de valores y vectores propios del análisis de componentes principales en dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Table 2. Matrix of eigenvalues and eigenvectors of principal component analysis in two populations of *P. hartwegii* Lindl.

CP*	Valores Propios	% Varianza Total	Valor Propio Acumulado	% Acumulado
1	3,445760	31,32509	3,44576	31,3251
2	1,801221	16,37473	5,24698	47,6998
3	1,632841	14,84401	6,87982	62,5438

*CP = Componentes principales; * CP = Principal components

Tabla 5. Variación aportada por cada variable a los tres primeros componentes principales (CP) en dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Table 5. Variation contributed by each trait to the first three principal components (PC) in two populations of *P. hartwegii* Lindl.

Caracteres	CP ₁	CP ₂	CP ₃
LC	0,547579	0,623302	-0,377147
AAC	0,145911	0,275375	-0,437527
PC	0,542902	0,601478	-0,327742
ABC	0,491182	0,141383	0,063267
LAM	0,848835	-0,147327	0,347652
LB	0,253365	-0,336840	-0,091014
LF	0,919832	-0,152251	0,232092
LAME	0,887825	-0,157956	0,278722
PS	-0,061339	-0,042983	0,576068
LS	-0,142595	0,730893	0,566902
GS	-0,381430	0,485561	0,523281

Los valores en negritas conforman el CP correspondiente. LC = Largo cono; AAC = Ancho ápice del cono; PC = Peso cono; ABC = Ancho de la base del cono; LAM = Largo de la acícula mayor; LB = Largo del braquiblasto; LF = longitud del fascículo; LAME = Largo de la acícula menor; PS = Peso de la semilla; GS = Grosor de la semilla; LS = Largo de la semilla.

Values in bold correspond to the indicated CP. LC = Cone length; AAC = Width at the top portion of the cone; PC = Cone weight; ABC = Width of the cone base; LAM = Length of the longest needle; LB = Length of the brachyblast; LF = Fascicle length; LAME = Length of the smallest needle PS = Seed weight; GS = Seed thickness; LS = Seed length; GS = Seed width.

en los extremos de variación agruparon el 41,7 y 100% de los árboles pertenecientes a las poblaciones de Cofre de Perote y Pico de Orizaba, respectivamente (Fig. 2). Los grupos II y III resultaron más heterogéneos y estuvieron conformados por el 80% y 91,7% de los individuos de Pico de Orizaba y Cofre de Perote. Estos grupos estuvieron conformados por el 41,7% y 50% de los árboles de Cofre de Perote y Pico de Orizaba, respectivamente. Los árboles de los grupos III y IV, conformados en su mayoría por árboles del Pico de Orizaba, se caracterizaron por presentar en general valores más elevados sobre todo para las características foliares y de cono evaluadas.

Estos resultados concordaron con lo obtenido del análisis de conglomerado efectuado con las variables que más contribuyeron a la formación de los dos primeros componentes principales. El dendrograma permitió clasificar a los individuos evaluados en dos grupos pero, al igual que lo obtenido en el análisis de componentes principales, no se apreció una

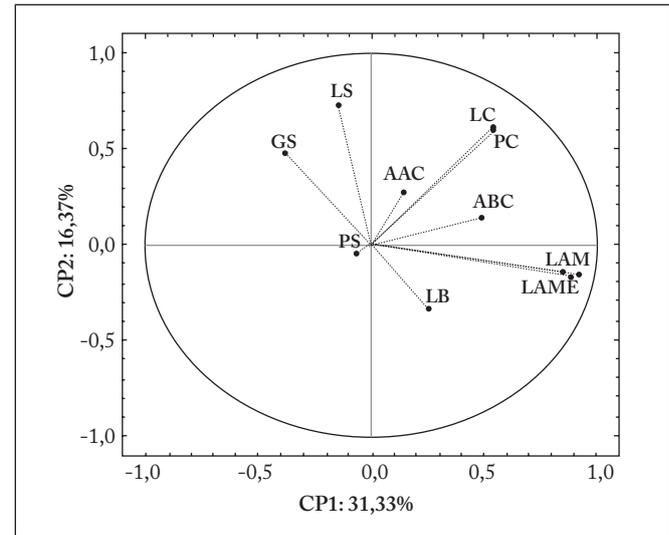


Fig. 1. Distribución de las variables morfológicas evaluadas en el plano conformado por los dos primeros componentes (CP1 y CP2) en dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Fig. 1. Distribution of morphometric traits evaluated in the plane formed by the first two components (CP1 and CP2) in two populations of *P. hartwegii* Lindl.

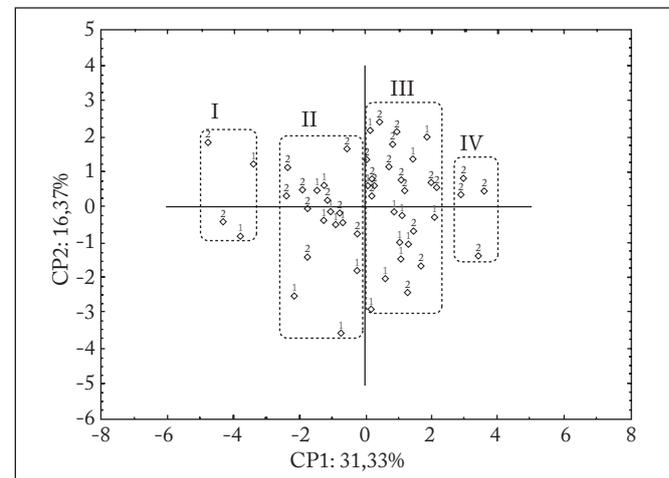


Fig. 2. Distribución de los individuos analizados con base a los dos primeros componentes principales (CP I y II). Cada símbolo representa al menos un individuo.

1: Cofre de Perote y 2: Pico de Orizaba. I, II, III y IV: Grupos
Fig. 2. Distribution of organisms analyzed per samples on the base of the two first principal components (CP I and II). Each symbol represents at least an individual. 1= Cofre de Perote and 2= Pico de Orizaba; I, II, III and IV: Groups

clara diferenciación morfológica de los arboles evaluados por población (Fig. 3). El grupo I agrupó el 53,3% de los individuos de la población del Pico de Orizaba, mientras que el grupo II, estuvo conformado por el 66,7% de los individuos de la población del Cofre de Perote.

Los resultados del análisis discriminante [Lambda de Wilks = 0,74059; $F(6,47) = 2,7438$ $p < 0,0228$] arrojaron los valores estimados de las funciones discriminantes canónicas que se presentan en la Tabla 6.

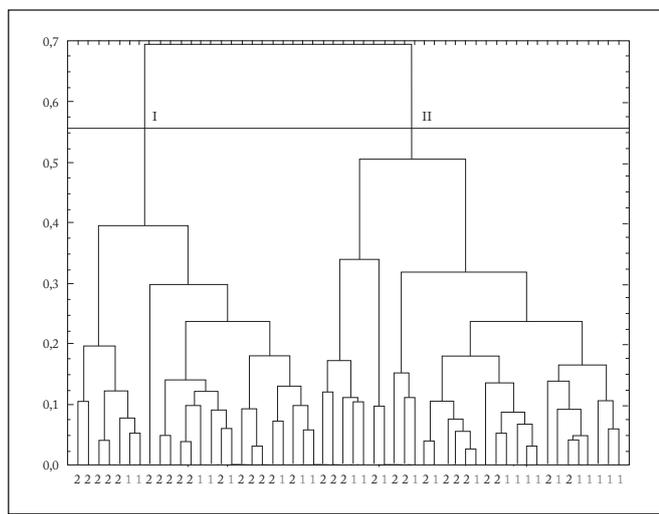


Fig. 3. Dendrograma resultante del análisis conglomerado de dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl. (1: Cofre de Perote y 2: Pico de Orizaba; I y II: Grupos).

1: Cofre de Perote y 2: Pico de Orizaba. I, II, III y IV: Grupos
Fig. 3. Dendrogram resulting from cluster analysis of two populations *P. hartwegii* Lindl. (1: Cofre de Perote and 2: Pico de Orizaba; I y II: Grupos).

Tabla 6. Funciones discriminantes para las variables morfométricas evaluadas en dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Table 6. Discriminant functions for the morphometric traits evaluated in two populations of *P. hartwegii* Lindl.

Variables	Lambda Wilks	Lambda Parcial	F	p
LC*	0,827331	0,895161	5,504512	0,023236
PC	0,740598	0,999996	0,000190	0,989046
LAM	0,744762	0,994404	0,264493	0,609460
LF	0,753822	0,982453	0,839434	0,364236
LAME	0,781988	0,947066	2,626940	0,111755
LS	0,743724	0,995792	0,198593	0,657905

*= Significativo $p \leq 0,05$; LC = Largo cono; PC = Peso cono; LAM = Largo de la acícula mayor; LF = Longitud del fascículo; LS = Largo de la semilla; GS = Grosor de la semilla.
 *= Significant at $p \leq 0,05$; LC = Cone length; PC = Cone weight; LAM = Length of the longest needle; LF = Fascicle length; LS = Seed length; GS = Seed width.

De acuerdo con estos resultados la variable longitud del cono (LC) fue la única importante, por su mayor valor de lambda de Wilks. En la tabla 7 se presentan las funciones de clasificación de dichas poblaciones en base a las características morfométricas que más contribuyeron a la variación detectada. De acuerdo con estos resultados, los árboles del Pico de Orizaba presentaron valores relativamente más elevados para esta variable. Sobre esta base se determinó que aproximadamente el 74% de los árboles evaluados fueron clasificados correctamente (Tabla 8).

Las mediciones morfométricas han sido ampliamente usadas en la discriminación de poblaciones de diferentes especies de coníferas. Los patrones de variación morfológica encontrados en los análisis de componentes principales y de conglomera-

Tabla 7. Funciones de clasificación morfométrica de dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Table 7. Morphometric classification functions of two populations of *P. hartwegii* Lindl.

Variables	Funciones discriminantes	
	Cofre de Perote $p = 0,55556$	Pico de Orizaba $p = 0,44444$
LC*	303,512	325,117
PC	-41,700	-41,746
LAM	-167,420	-175,057
LF	578,261	560,290
LAME	30,429	56,248
LS	-213,664	-218,251
Constante	-354,451	-374,022

* Significativo $p \leq 0,05$, LC = Largo cono; PC = Peso cono; LAM = Largo de la acícula mayor; L = Longitud del fascículo; LS = Largo de la semilla; GS = Grosor de la semilla.

* significant at $p \leq 0,05$; LC = Cone length; PC = Cone weight; LAM = Length of the longest needle; LF = Fascicle length; LS = Seed length; GS = Seed width.

Tabla 8. Matriz de clasificación del análisis discriminante para dos poblaciones de *P. hartwegii* Lindl.

Table 8. Classification matrix of the discriminant analysis for two populations of *P. hartwegii* Lindl.

Población	Porcentaje	Cofre de Perote $p = 0,55556$	Pico de Orizaba $p = 0,44444$
Cofre de Perote	83,33334	25	5
Pico de Orizaba	62,50000	9	15
Total	74,07407	34	20

Filas = Clasificación observada. Columna = Clasificación predicha.
 Rows = Observed classification. Columns = Predicted classification.

rados convergieron en la existencia de variación continua en las características morfológicas evaluadas. Esto no permitió la clara diferenciación fenotípica de ambas poblaciones, pero sí entre árboles dentro de las poblaciones. Estos resultados concuerdan con lo indicado por diversos autores en cuanto a que una gran parte de la fracción de la variación fenotípica de los caracteres examinados en coníferas, se encuentra entre árboles dentro de las poblaciones (López et al., 1993; Beaulieu y Simon, 1994). Los pinos pueden presentar una amplia variación genética intrapoblacional, debido en parte a que presentan un largo ciclo de vida y un tipo de polinización anemógama (Ledig, 2000).

Los resultados de los análisis univariados y multivariados proporcionaron evidencia congruente de la existencia de una heterogeneidad morfológica intraespecífica en las dos poblaciones de *P. hartwegii* en estudio. Como se sabe, la variación morfológica de una especie vegetal está íntimamente ligada a las condiciones medioambientales que prevalecen en el ciclo de vida de la misma. La estrecha relación planta-medio ambiente marca la importancia que las plantas posean una suficiente flexibilidad de desarrollo o resistencia a disturbios para existir en las condiciones donde se ubican (Stebbins, 1950). En este estudio se detectaron algunos ecotipos en la población del Pico de Orizaba con los mayores valores de características, como el largo del cono, que contrastaron con ciertos ecotipos presentes en la población del Cofre de Perote que mostraron los menores valores para dicha característica.

El origen, el nivel y la estructura de la diversidad fenotípica observada es el resultado de diversos factores genético-ambientales. Es posible que la variación detectada en la longitud de los conos de los árboles evaluados en las dos poblaciones estudiadas resulte de la expresión de la plasticidad fenotípica debido a las condiciones microambientales experimentadas por cada árbol. Sin embargo, también es posible que dicha variación sea el resultado de diferencias genotípicas entre individuos. Es muy posible además que la presencia de una sola variable discriminatoria significativa entre las dos poblaciones analizadas pueda ser indicativa de la presencia de un aislamiento parcial entre ambas poblaciones. Al respecto, los resultados del análisis discriminante revelaron la existencia de poca diferenciación fenotípica de las dos poblaciones analizadas lo que podría estar relacionado con las características ambientales de dichas poblaciones. Como en este trabajo no se incluyeron en el análisis datos ambientales de ambas poblaciones, no es posible confirmar si la variación detectada estuvo asociada con alguna condición ambiental en particular. Investigaciones futuras que empleen marcadores moleculares podrían contribuir a sustentar estos hallazgos. El conocimiento de la variación fenotípica y genotípica de una especie es un prerrequisito para conservarla. Aunque *P. hartwegii* no se encuentra aun oficialmente en la condición de amenazado, se requieren de estudios que permitan establecer estrategias eficientes de conservación de esta especie.

AGRADECIMIENTOS

El segundo autor agradece al Gobierno de México, a través del Instituto Mexicano de Cooperación Internacional (IMEXCI) de la Secretaría de Relaciones Exteriores, por la beca otorgada. Se agradece además a la Fundación Produce Veracruz por el apoyo financiero brindado al proyecto "Manejo de la Población de *P. hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Ver."

REFERENCIAS

- Arriaga, L. y L. Gómez (2004). Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En: Martínez, J. y Fernández-Bremauntz (comps.) pp. 255-265. Cambio Climático: una Visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 525 p.
- Beaulieu, J. y J.-P. Simon (1994). Genetic structure and variability in *Pinus strobus* in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 24: 1726-1733.
- Bonilla, V.O. (1993). Variación natural en *Pinus hartwegii* Lindl.: Longitud de traqueidas de las maderas a lo largo del eje neovolcánico. Tesis de Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México. 75 p.
- Borghetti, M., G.G. Vendramin, R. Giannini y A. Schettino (1989). Effects of stratification, temperature and light on germination of *Pinus leucodermis*. *Acta Oecologica, Ecología Plant.* 10: 45-56.
- Callahan, R.Z. (1964). Investigación de procedencias; estudio de la diversidad genética asociada a la Geografía. *UNASYLIA* 18: 40-50.
- Farjon, A. y B.T. Styles (1997). *Pinus* (Pinaceae). Flora Neotrópica. Monograph 75. New York Botanical Garden, N.Y. 291 p.
- Iglesias, L., J. Alba-Landa y J.L. Enríquez (1999). Estrategias para la conservación de la población de *Pinus hartwegii* Lindl. en la región del Cofre de Perote, Veracruz. *Monte Bravo* 4-5: 20-22.
- Iglesias, A., L. G. y Y. Tivo F. (2006). Variación morfométrica de la población de *Phartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Ver., México. *Ra-Ximhai* 2: 449-468.
- Iglesias, A., L.G. y M. Luna R. (2008). Polimorfismo isoenzimático en la población de *Pinus hartwegii* Lindl. del Cofre de Perote, Ver., México. *Ecosistemas* 17: 115-122.
- Lauer, W. (1973). The altitudinal belts of the vegetation in the central Mexican highlands and their climatic conditions. *Arctic Alpine Research* 5: 99-113.
- Lauer, W. (1978). Timberline studies in central Mexico. *Arctic Alpine Research* 10: 383-396.
- Ledig, F.T. (2000). Genetic variation in *Pinus*. En: Richardson, D.M. (ed.), pp. 251-280. Ecology and Biogeography of *Pinus*. Cambridge University Press. Cambridge. 527 p.
- López U., J., J. Jasso, J.J. Vargas y J.C. Ayala (1993). Variación de características morfológicas en conos y semillas de *Pinus greggii*. *Agrociencia. Serie Recursos Naturales Renovables* 3: 81-95.
- Martínez, M. (1948). Los Pinos Mexicanos. Ediciones Botas. México, D.F. 361 p.
- Musálem, S., M.A. y M.A. Solís P. (2000). Monografía de *Pinus hartwegii*. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México. 96 p.

- Niniz, R., R. (2005). Variación morfológica de conos y semillas de *Pinus hartwegii* Lindley, a lo largo de un gradiente altitudinal en Pico de Tancitaro, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Mich., México. 45 p.
- Pérez-Rodríguez, P. y T. Eguiluz-Piedra (1985). Variación morfológica en *Pinus hartwegii* del eje Neovolcánico. En: III Reunión Nacional sobre Plantaciones Forestales. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Publicación Especial No. 48. México, D.F. pp. 245-270.
- Perry, J.P. (1991). The Pine of Mexico and Central America. Timber Press, Portland, Oregon, USA. 221 p.
- RAO, C.R. 1952. Advanced Statistical Methods in Biometrical Research. John Wiley and Sons, New York. 378 p.
- Remington, D.L. y D.M. O'Malley (2000). Whole genome characterization of embryonic state inbreeding depression in a selfed loblolly pine family. *Genetics* 155: 337-348.
- Reyes, O. y M. Casal (2002). Effect of high temperatures on cone opening and on the release and viability of *Pinus pinaster* and *P. radiata* seeds in NW Spain. *Annals of Forest Science* 59: 327-334.
- Sáenz-Romero, C., G.E. Rehfeldt, N.L. Crookston, P. Duval, R. St-Amant, J. Beaulieu y B.A. Richardson (2010). Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. *Climatic Change* 102: 595-623.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (1984). Normales Climatológicas. Dirección General de Geografía y Meteorología. México. 799 p.
- Solís, R.L. (2002). Contribución al conocimiento de la población de *Pinus hartwegii* Lindley del Pico de Orizaba, Veracruz, México. Tesis de Maestría. Instituto de Genética Forestal, Xalapa, Veracruz, México. 130 p.
- Steel, R.G.D. y J.H. Torrie (1988). Bioestadística: Principios y Procedimientos. Primera edición. McGraw-Hill. México. 422 p.
- Stoehr, M.U. y R.E. Farmer (1986). Genetic and environmental variance in cone size, seed yield, and germination properties of black spruce clones. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1149-1151.
- Villers, L. y I. Trejo (2004). Evaluación de la vulnerabilidad en los ecosistemas forestales. En: Martínez, J. y Fernández-Bremauntz (comps.), pp. 239-254. Cambio Climático: una Visión desde México. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F. 525 p.
- Viveros-Viveros, H., C. Saénz-Romero, J. López-Upton y J.J. Vargas-Hernández (2007). Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacan, Mexico. *Forest Ecology and Management* 253: 81-88.
- Viveros-Viveros, H., C. Saénz-Romero, J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez-Valverde y A. Santacruz-Varela (2009). Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl.: I. Height growth, shoot phenology and cold damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842.
- Viveros-Viveros, H., B.L. Tapia-Olivares, C. Saenz-Romero, J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, A. Santacruz-Varela y G. Ramírez-Valverde (2010). Variación isoenzimática de *Pinus hartwegii* Lindl. en un gradiente altitudinal en Michoacán, México. *Agrociencia* 44: 723-733.
- Williams, C.G. y O. Savolainen (1996). Inbreeding depression in conifers: implications for breeding strategy. *Forest Science* 42: 102-117.