



## Selección fenotípica y características reproductivas de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison

## Phenotype selection and reproductive characteristics of *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison

Rey David Aragón Peralta<sup>1</sup>, Gerardo Rodríguez Ortiz<sup>1\*</sup>, José Jesús Vargas Hernández<sup>2</sup>, José Raymundo Enríquez del Valle<sup>1</sup>, Adán Hernández Hernández<sup>3</sup> y Gisela Virginia Campos Ángeles<sup>1</sup>

### Abstract

*Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana*, an important species of Oaxaca State from its wood quality; even though it is preferred for reforestation and plantations, the seed production capacity of this species is unknown. The aim of the actual study was to evaluate the morphological variation, reproductive characteristics and their relationship with environmental factors of cones and seeds of selected *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* trees as seed trees from five provenances of the state. From November to December 2017, 1 058 cones were collected from 42 selected trees, to which the following characteristics were assessed: length, diameter, dry weight, number of scales, number and of weight of fully developed seeds, average weight per seed, reproductive efficiency and inbreeding index. Trees and provenances were differentiated by analysis of variance and mean tests (Duncan, 0.05). Reproductive characteristics were correlated with environmental variables (collection sites) and morphological characteristics. Selected trees were 51.7±8.0 years old, 36.4±4.6 m high and 54.5±8.2 cm diameter at breast height. The average values per cone were: 101.3 mm long; 56 mm diameter, 97.9 g dry weight; 133 scales; 107 developed seeds per cone; 2.35 g weight of developed seeds per cone; 0.021 g average weight per seed; reproductive efficiency of 13.09 mg per gram of strobilus; inbreeding index (II = 0.50) indicates a high level of self-fertilization. Of the evaluated characteristics, reproductive efficiency and II did not show significant differences.

**Key words:** Outstanding tree, seed tree, cones characteristics, reproductive characteristics, inbreeding, environmental factors.

### Resumen

*Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* es un taxon importante en Oaxaca por la calidad de su madera; aunque, también es preferida para la reforestación y plantaciones, pero se desconoce su capacidad para la producción de semilla. Los objetivos de la presente investigación consistieron en evaluar la variación morfológica, conocer las características reproductivas de conos y semillas y su relación con factores ambientales de árboles semilleros de la especie de interés seleccionados en cinco procedencias del estado. Durante noviembre y diciembre de 2017, se recolectaron 1 058 conos de 42 individuos a los que se les midieron variables morfológicas, y determinaron la eficiencia reproductiva e índice de endogamia; los árboles y procedencias se diferenciaron mediante análisis de varianza y pruebas de medias de *Duncan*. Las características reproductivas se correlacionaron con variables ambientales (sitios de recolecta) y dasométricas de los progenitores. Los datos registrados fueron 51.7±8.0 años de edad, altura de 36.4±4.6 m y diámetro normal de 54.5±8.2 cm. Los valores medios obtenidos por cono fueron: longitud 101.3 mm, diámetro 56 mm, peso seco 97.9 g, 133 escamas, 107 semillas desarrolladas por cono; las semillas desarrolladas por cono pesaron 2.35 g, peso promedio por semilla 0.021 g; eficiencia reproductiva 13.09 mg por gramo de estróbilo; IE = 0.50 (índice de endogamia), que indica un alto nivel de autofecundación; el IE decrece con la altitud y aumenta con la cantidad de recolecta. De las características evaluadas, la eficiencia reproductiva e IE no mostraron diferencias significativas entre poblaciones.

**Palabras clave:** Árbol sobresaliente, árbol semillero, características de conos, características reproductivas, endogamia, factor ambiental.

Fecha de recepción/Reception date: 22 de noviembre de 2019

Fecha de Aceptación/Acceptance date: 13 de marzo de 2020

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. México.

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

<sup>3</sup>Campo Experimental Valles Centrales, CIR-Pacífico Sur, INIFAP. México.

\*Autor por correspondencia, correo-e: gerardo.rodriguez@voaxaca.tecnm.mx

## Introducción

*Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison es una conífera de importancia económica en México por su uso maderable; tiene un crecimiento relativamente rápido, buena forma de tronco y excelente calidad de la madera (López-Upton, 2002), por lo que es muy apropiada para el establecimiento de plantaciones comerciales y reforestaciones en el sur de México (Viveros *et al.*, 2005). En la actualidad, existe interés por conservar e incrementar las áreas con esta especie, lo cual ha generado una gran demanda de plántula de calidad fenotípica y genética (Semarnat, 2016). Cada año se produce plántula con este fin (Domínguez *et al.*, 2016); sin embargo, la recolección de las semillas procede de rodales naturales en años semilleros, y no se tiene registro de las características de los árboles progenitores. Por ello, en ocasiones no es posible asegurar la calidad de las plantas que se obtienen, ni sus probabilidades de supervivencia en el sitio de su establecimiento definitivo. Muchas veces también, es afectada por la calidad de las semillas que incluye sus características físicas, el porcentaje de material vano, el de viabilidad; y por lo tanto, el porcentaje de germinación y la energía germinativa (Bustamante-García *et al.*, 2012).

Ante este escenario, es necesario realizar programas de mejoramiento genético de árboles que, combinado con un apropiado manejo de los procedimientos de propagación en vivero, apoyen a las plantaciones y reforestaciones; además de aumentar la supervivencia, la productividad y la calidad de la madera en las futuras generaciones (Salaya-Domínguez *et al.*, 2012). Para lograr lo anterior, desde 2017 se está llevando a cabo el establecimiento de un huerto semillero asexual en el estado de Oaxaca, el cual está bajo la responsabilidad del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), con financiamiento del fondo sectorial Conacyt-Conafor. A la fecha, ya se tiene separados los individuos con características fenotípicas deseables (Leyva-Ovalle y Vargas-Hernández, 2018).

Los árboles seleccionados en diferentes poblaciones pueden mostrar variación en el grado de expresión de diversas características, debido a la calidad del sitio; ello representa la respuesta en el desarrollo de una determinada especie arbórea a la totalidad de las condiciones ambientales (edáficas, climáticas y bióticas) existentes en un lugar en particular (Kimmins, 2004). Así que la selección de árboles a través de un gradiente altitudinal y diversos ambientes presentan patrones de variación genética diferencial; sin embargo, en Oaxaca no se conoce lo suficiente sobre el tipo de distribución en *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*, lo cual limita la creación de lineamientos para el movimiento de semillas y plántulas para reforestación y su adaptación al cambio climático (Castellanos *et al.*, 2013).

En este contexto, los escenarios del cambio climático indican que en México para el año 2030 habrá un aumento en la temperatura promedio anual (comparado con el promedio 1961-1990) de 1.5 °C y una disminución en la precipitación de 7 % (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Un incremento de la temperatura propiciará la expansión de los bosques hacia latitudes altas, mientras que en latitudes medias se espera un decremento o migración de poblaciones a zonas con climas más adecuados para su desarrollo (Sáenz *et al.*, 2011).

El cambio climático representa, entonces, un reto adicional para acoplar los genotipos a los ambientes, si se parte del hecho de que la variación en la morfología de conos y semillas puede estar determinada, principalmente, por las características genotípicas y la restricción impuesta por el ambiente (Krannitz y Duralia, 2004). Se desconoce la proporción relativa de estos dos factores en su contribución a la variación fenotípica a nivel de población, especie e incluso entre individuos (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2011).

El buen uso del germoplasma forestal requiere del conocimiento de las características morfológicas de conos y semillas de los árboles seleccionados (Quiroz-Vásquez *et al.*, 2017); también del potencial y eficiencia de producción de semilla para estimar la cantidad y calidad de germoplasma (Sáenz-Romero *et al.*, 2012); sin embargo, en Oaxaca aún se desconoce la capacidad de producción de semilla de los bosques naturales de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

Los objetivos del presente trabajo consistieron en evaluar la variación morfológica y las características reproductivas de conos y semillas de árboles de *P. pseudostrabus* var. *oaxacana* selectos como semilleros, así como correlacionarlas con las variables climáticas de los sitios de recolecta y las características dasométricas de fenotipos procedentes de distintas poblaciones del estado de Oaxaca.

## **Materiales y Métodos**

### **Áreas de selección y recolecta de semillas de árboles fenotípicamente superiores**

Durante noviembre y diciembre de 2017 se seleccionaron 42 árboles fenotípicamente superiores, en rodales de *P. pseudostrabus* var. *oaxacana* de los municipios Santa Catarina Ixtepeji, Teococuilco de Marcos Pérez, Santa María Jaltianguis y San Pedro Yoloix, ubicados en la Sierra Norte del estado de Oaxaca; para ello se aplicó la metodología de árboles por comparación o testigos (Bramlett *et al.*, 1977), en la que las características de un candidato de árbol superior o plus, se comparan con los cinco mejores árboles vecinos localizados a una distancia mínima de 25 m y máxima de 50 m, dentro de una población. Los individuos candidato y testigos estaban en edad reproductiva obtenida con taladro de *Pressler* ( $51.7 \pm 8.0$  años), pertenecientes al estrato dominante, con fuste recto, no bifurcado ni torcido, copa redonda, inserción de ramas a  $90^\circ$  al fuste, tamaño de copa de  $1/3$  de la altura total del árbol, diámetro ( $54.5 \pm 8.2$  cm), altura ( $36.4 \pm 4.6$  m), volumen total ( $3.8 \pm 1.4$  m<sup>3</sup>) y altura de fuste limpio ( $21.8 \pm 4.6$  m) mayor al promedio de los árboles testigo; eran árboles sanos, libres de plagas y enfermedades (Muñoz-Flores *et al.*, 2013) (Cuadro 1). Las alturas se midieron con clinómetro (*Suunto*, modelo PM5/1520) y los diámetros con cinta diamétrica (*Forestry Suppliers Inc.*, modelo 283D/20F).

**Cuadro 1.** Características de fenotipos sobresalientes de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison.

Variable	Ixtepeji	Ixtlán	Jaltianguis	Teococuilco	Yolox
Altura (m)	37.4±0.2	39.5±2.5	34.8±0.2	35.7±0.3	40.0±0.3
AFL (m)	23.6±0.2	26.0±0.0	18.3±0.2	21.8±0.3	24.5±0.5
Diámetro normal (cm)	58.3±0.4	58.3±3.8	52.9±0.5	51.2±0.3	54.9±0.7
Edad (años)	55.4±0.2	53.5±5.5	50.0±0.7	49.6±0.4	47.5±0.3
Área de copa (m <sup>2</sup> )	53.6±0.3	-	58.2±0.4	56.4±0.3	59.2±0.8
Área basal (m <sup>2</sup> )	0.3±0.0	0.3±0.0	0.2±0.0	0.2±0.0	0.2±0.0
Volumen total (m <sup>3</sup> ) <sup>¶</sup>	4.5±0.1	4.6±0.8	3.5±0.1	3.3±0.1	4.1±0.1
Volumen comercial (m <sup>3</sup> )	4.3±0.1	4.5±0.8	3.3±0.1	3.2±0.1	4.0±0.1
DB (kg m <sup>-3</sup> )	506.5±3.0	528.8±12.9	489.2±3.1	493.7±1.9	477.5±0.6

Fuente: Sistema Biométrico de Oaxaca (Corral-Rivas y Vargas-Larreta, 2013).

AFL = Altura de fuste limpio; DB = Densidad básica de la madera. Se incluye la media ± error estándar.

El índice de dominancia de copa, como una medida de disponibilidad de polen para los ejemplares vecinos del árbol seleccionado como superior, se calculó al restar la altura del candidato menos la altura promedio de los testigos; el índice de calidad de sitio se obtuvo del cociente entre la altura promedio y la edad promedio del árbol seleccionado como superior y sus testigos; y el índice de productividad de sitio, del cociente entre el volumen promedio y la edad promedio del árbol seleccionado como superior y sus testigos (Vallejos *et al.*, 2010).

De los individuos seleccionados se recolectaron 1 058 conos en total que fueron identificados y trasladados al invernadero forestal del INIFAP, en Valles Centrales de Oaxaca para analizarse durante el periodo 2018-2019. Los conos se separaron por árbol selecto (42) en costales de rafia identificados, donde permanecieron entre 2 y 3 días; finalmente, los conos se disectaron para liberar la semilla, que fue almacenada de 2 a 3 meses en bolsas de papel.

### **Análisis de conos y semillas**

El análisis de los conos se basó en la metodología de Bramlett *et al.* (1977) y Mosseler *et al.* (2000) con modificaciones de acuerdo al estudio. Los indicadores o características reproductivas que se analizaron fueron: peso fresco (*PVC*, g) de cada cono, determinado mediante una balanza analítica (*Shimadzu* modelo ATY224) con capacidad de 200 g  $\pm$ 0.1 mg; la longitud (*LC*, mm) y el diámetro del cono (*DC*, mm) se midieron con un vernier digital  $\pm$ 0.2 mm (*Titan*<sup>®</sup> *Classic*). Posteriormente, todos los conos separados por árbol se expusieron de dos a tres semanas a la radiación solar en un invernadero para provocar la apertura de escamas y la extracción de semillas. El peso seco de cada cono (*PSC*, g) se registró después de la apertura de las escamas a temperatura ambiente, cuando habían transcurrido de dos a tres semanas de su recolecta. Se contabilizó el número total de escamas por cono (*NE*), el número de semillas desarrolladas por cono (*NSDC*) correspondió a semillas maduras (incluyendo vanas y llenas); y se determinó el peso de las desarrolladas por cono (*PSDC*, g). Con esta información se calcularon las siguientes relaciones:



$$CH = \frac{[PVC - PSC]}{PVC} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$CF = \frac{DC}{LC} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$EPSD = \frac{PSDC}{PSC} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$PPS = \frac{PSDC}{NSDC} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$PEE = \left[ \frac{NSDC}{(2NE)} \right] \times 100 \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

*CH* = Contenido de humedad (%)

*PVC* = Peso fresco del cono (g)

*PSC* = Peso seco del cono (g)

*CF* = Coeficiente de forma del cono, diámetro del cono (*DC*, mm), longitud del cono (*LC*, mm)

*EPSD* = Eficiencia de producción de semillas desarrolladas

*PSDC* = Peso de semillas desarrolladas/cono

*PPS* = Peso promedio por semilla

*NSDC* = Número de semillas desarrolladas por cono

*PEE* = Porcentaje de eficiencia de escamas

*NE* = Número total de escamas por cono (como una medida de escamas efectivas para producir semillas)

Para determinar la cantidad de semilla llena y vana y así obtener la eficiencia reproductiva e índice de endogamia por cono y árbol (Bramlett *et al.*, 1977), las variables de los conos y semillas procedieron de una muestra de 50 conos.

Posteriormente, se estimaron cinco indicadores reproductivos propuestos por Mosseler *et al.* (2000): 1) peso total de conos en el árbol (*PCA*, g); 2) sumatoria del peso seco de conos; 3) número de semillas desarrolladas por árbol (*NSDA*); además, los que se describen con las ecuaciones 6 y 7:

$$ER = \left[ \frac{PSDA}{PSC} \right] \times 100 \quad \text{Ec. 6}$$

$$IE = \frac{SV}{SL} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

*PSDA* (g) = Suma de los pesos de semillas desarrolladas en el total de conos

*ER* (g) = Eficiencia reproductiva, como una medida que refleja la proporción de la energía utilizada en el esfuerzo reproductivo almacenado en la semilla

*IE* = Índice de endogamia

*SV* = Semillas vanas

*SL* = Semillas llenas



## **Variables climáticas**

A fin de obtenerse variables fisiográficas y climáticas de los sitios de procedencia del material recolectado, las coordenadas de ubicación geográfica de los árboles seleccionados como superiores se ingresaron a la página de internet del *WorldClim*: Investigación sobre el cambio climático en los bosques: efectos potenciales del calentamiento global en los bosques y las relaciones entre el clima vegetal en el oeste de América del Norte y México (WorldClim, 2019).

## **Manejo y análisis de datos**

Mediante el modelo general linealizado se diferenciaron los árboles, sus procedencias y subprocedencias, que fueron definidas de acuerdo a la ubicación geográfica de los primeros. Se realizaron transformaciones  $\ln(x)$  y raíz cuadrada a las variables reproductivas de los ejemplares seleccionados como árboles plus para el cumplimiento de la normalidad y homogeneidad de las varianzas.

El modelo utilizado fue:

$$Y_{ijkl} = \mu + R_i + P_j(R_i) + A_k(P_j) + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$  = Valor de la variable dependiente

$\mu$  = Media poblacional

$R_i$  = Efecto de la  $i$ -ésima región geográfica

$P_j(R_i)$  = Procedencia o localidad de recolecta anidada en región

$A_k(P_j)$  = Árbol anidado en procedencia

$\varepsilon_{ijk}$  = Error experimental

Se estimaron los componentes de varianza asociados a cada fuente de variación (indicadas en el modelo) y su contribución a la varianza total, por el procedimiento VARCOMP, opción REML; con el GLM se separaron progenies, las procedencias con la prueba de *Duncan* ( $\alpha = 0.05$ ); y para las asociaciones entre las variables morfológicas y las características reproductivas con variables climáticas, se hizo un análisis de correlación de *Pearson* y las diferencias estimadas con *Duncan* (SAS®) (SAS, 2004).

## Resultados y Discusión

### Características reproductivas de conos y semillas

Los análisis de varianza evidenciaron que las cuatro regiones, así como las interacciones procedencia  $\times$  región y árbol  $\times$  procedencia tuvieron diferencias altamente significativas ( $p \leq 0.01$ ) en las características reproductivas de conos y semillas (Cuadro 2). En otras especies de *Pinus*, como *P. leiophylla* Schltdl. & Cham. (Gómez *et al.*, 2010), *P. engelmanni* Carr. (Bustamante-García *et al.*, 2012), *P. greggii* Engelm. ex Parl. (Rodríguez *et al.*, 2012) y *P. patula* Schiede ex Schltdl. & Cham (Salaya-Domínguez *et al.*, 2012) se han registrado diferencias entre sitios y entre árboles para los rasgos de dichas estructuras, lo que indica que están influenciados por el ambiente y que, probablemente, también exista diferenciación genética interpoblacional, sin que sea posible separar el efecto ambiental del genético (Viveros *et al.*, 2013).



**Cuadro 2.** Resumen del análisis de varianza para variables de conos y semillas de árboles selectos de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison.

Fuente de variación	Variable	R	P(R)	A(P)	Error	Total
		<b>3</b>	<b>5</b>	<b>33</b>	<b>1 016</b>	<b>1 057</b>
Cuadrados medios y significancia	<i>LC</i>	1 312.4**	5 007.1**	3 428.7**		
	<i>DC</i>	1 465.1**	726.4**	562**		
	<i>CF</i>	0.04**	0.07**	0.06**		
	<i>PV</i>	50 608.6**	52 094.5**	46 249.7**		
	<i>PS</i>	71 635.4**	25 594.3**	19 807.2**		
	<i>CH</i>	4.7**	0.3**	0.7**		
	<i>NE</i>	3 240.4**	785.7**	4 133.9**		
	<i>NSD</i>	33 028.5**	30 508.7**	36 361**		
	<i>PSD</i>	31.7**	24.5**	29.1**		
	<i>PPS</i>	28.1**	120.9**	69**		
	<i>PEE</i>	2**	1.5**	1.6**		

*R* = Región; *P(R)* = Procedencia anidada en región; *A(P)* = Árbol selecto anidado en región; *LC* = Longitud del cono; *DC* = Diámetro del cono; *CF* = Coeficiente de forma del cono; *PV* = Peso verde del cono; *PS* = Peso seco del cono; *CH* = Contenido de humedad; *NE* = Número de escamas totales; *NSD* = Número de semillas desarrolladas; *PSD* = Peso de semillas desarrolladas; *PPS* = Peso promedio por semilla; *PEE* = Porcentaje de efectividad de escamas. \*\* $p \leq 0.01$ .

Los conos recolectados en la procedencia de Yolox presentaron valores mayores al promedio general de la recolecta en ocho variables: longitud (105.6 mm), diámetro (59.2 mm), peso seco (140.9 g), número de escamas (138), número de semillas desarrolladas (132), peso de semillas desarrolladas (3.2 g), peso promedio por semilla (0.024 g) y porcentaje en efectividad de escamas (48 %) (Cuadro 3). El contenido de humedad fue menor al promedio (19 %), quizás debido a que al momento de reunir los conos, estos tenían un grado mayor de madurez, en comparación con los procedentes de las otras tres comunidades. Los originarios de Jaltianguis tuvieron los promedios más altos en coeficiente de forma (0.57) y peso verde (169.3 g), menor promedio en el número de semillas desarrolladas (97) y porcentaje de efectividad de escamas (34 %).

**Cuadro 3.** Componentes de varianza para las características de conos y semillas de árboles selectos de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G.Harrison.

Variables	Media general	Varianza total	Región (%)	Procedencia (Región, %)	Árbol (Procedencia, %)	Error (%)
LC (mm)	101.3	224.6	0**	0**	61**	39.0
DC (mm)	56	46.3	10**	0.9**	57.1**	32.0
CF	0.55	0.003	0**	0**	66**	34.0
PV (g)	155	3034.9	3**	0**	70**	27.0
PS (g)	97.9	1953.8	30**	0**	50**	20.0
CH (%)	62	0.094	33**	0**	33**	34.0
NE	133.7	471	1.6**	0**	34.2**	64.2
NSD	107	2420.6	0**	0**	67**	33.0
PSD (g)	2.3	1.94	0**	0**	70**	30.0
PPS (g)	0.02	0.000029	0**	0**	69**	31.0
PEE	0.40	0.03	1.3**	0**	56**	42.7

LC = Longitud del cono; DC = Diámetro del cono; CF = Coeficiente de forma del cono; PV = Peso verde del cono; PS = Peso seco del cono; CH = Contenido de humedad; NE = Número de escamas; NSD = Número de semillas desarrolladas; PSD = Peso de semillas desarrolladas; PPS = Peso promedio por semilla; PEE = Porcentaje de efectividad de escamas.

Los conos recolectados en Ixtepeji registraron promedios inferiores en ocho de 11 características evaluadas: longitud (99.05 mm), diámetro (53.5 mm), peso seco (85.2 g), peso verde (140.2 g), número de escamas (130), coeficiente de forma (0.54), peso de semilla desarrollada (2.1 g) y peso promedio por semilla (0.020 g), excepto en contenido de humedad (0.66 %), que fue superior al promedio general de recolecta (Cuadro 3).

La longitud y el diámetro del cono para las cuatro procedencias correspondieron al intervalo citado en la literatura para la especie estudiada (Márquez, 2007; Espinoza *et al.*, 2009; Sáenz-Romero *et al.*, 2011; Domínguez *et al.*, 2016); por el contrario, superan a los valores promedio para longitud (79.8 mm) y diámetro (38 mm) que consignan Espinoza *et al.* (2009). El número de semillas desarrolladas se ubicó por debajo del intervalo indicado por Domínguez *et al.* (2016) y mayor en el peso de las semillas desarrolladas por cono. Otros estudios documentan en semillas de *P. pseudostrobus* un peso de 0.011 g como mínimo y 0.022 como máximo (Hernández *et al.*, 2003), valores incluyentes en este estudio de Oaxaca.

### **Indicadores reproductivos y variables climáticas**

Los árboles de la localidad de Ixtepeji produjeron 35 conos en promedio, cantidad que fue significativamente ( $p \leq 0.05$ ) superior a los 20 y 22 conos que tuvieron los de las localidades de Teococuilco y Jaltianguis (Figura 1A). El total de conos en cada individuo pesó de 1 990 a 3 428 g, en los que se obtuvieron de 2 174 a 3 627 semillas, que en conjunto pesaron de 49.29 a 78.09 g; el total de semillas llenas fue de 899 a 1 712 (Figura 1B-D), magnitudes que en cada caso no fueron significativamente diferentes (*Duncan*, 0.05). En promedio, un cono recolectado de un árbol en Yolox pesó 144.83 g, que fue 66 % mayor al de un cono procedente de Ixtepeji; además, en cada cono de un árbol en Teococuilco se contabilizaron 71.75 semillas, que fue 75 % superior a las semillas llenas que se obtuvieron por cono de los árboles de Jaltianguis.

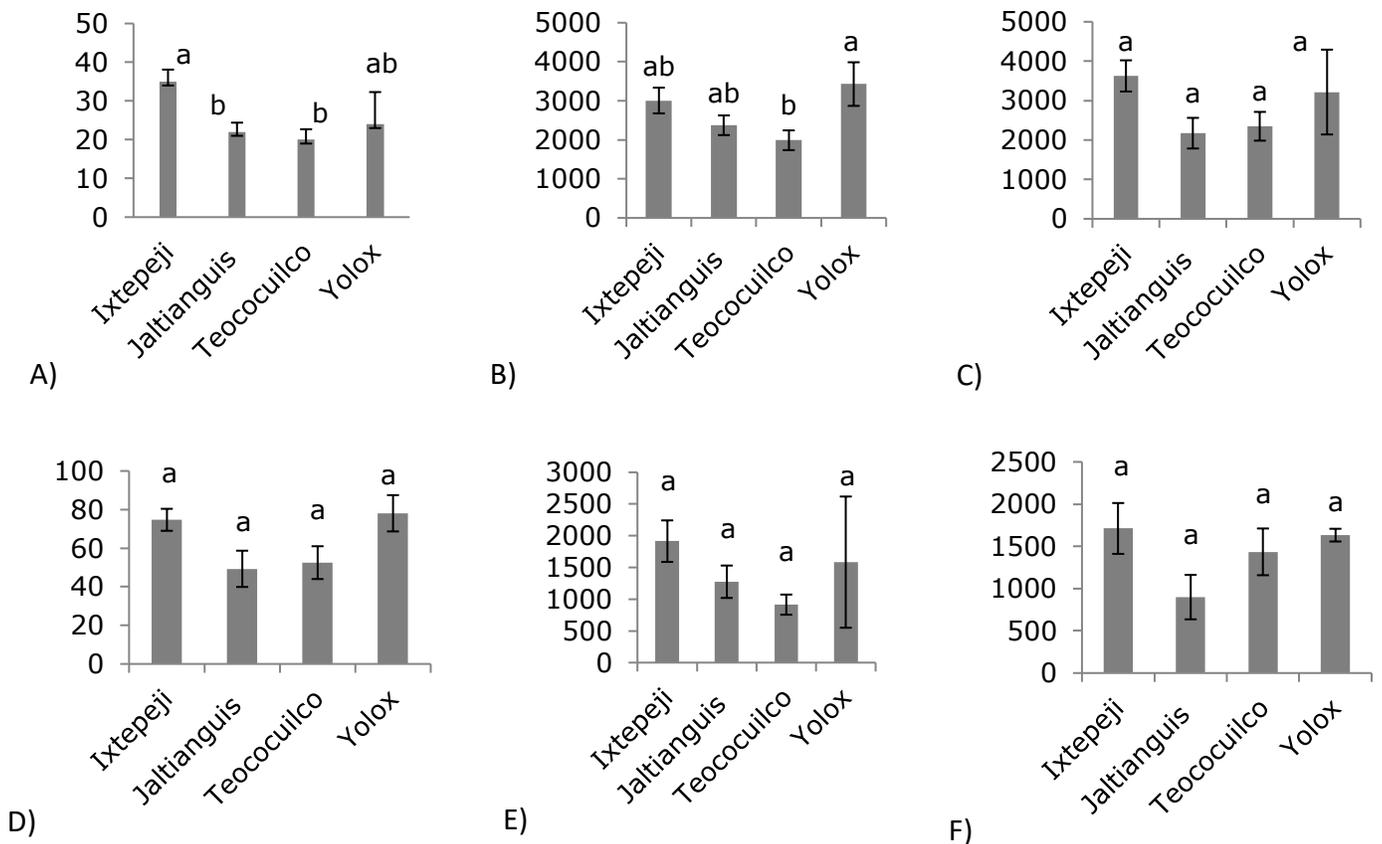
Las semillas llenas de los conos de Yolox pesaron 24.27 mg (Figura 1F), 17 % superior al peso de la semilla individual de árboles de Ixtepeji.

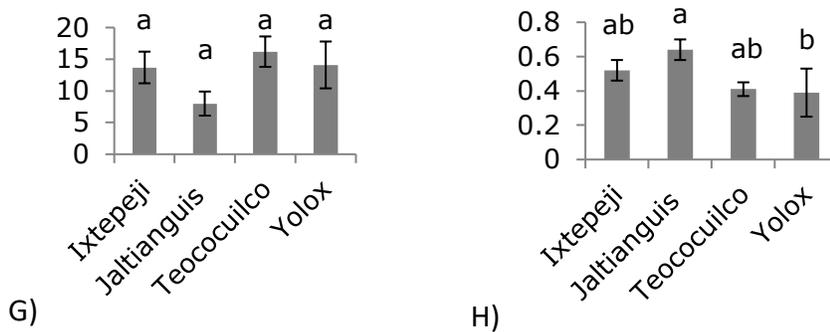
En *P. cembroides* Zucc. (González-Ávalos *et al.*, 2006) y *P. pinceana* Gordon (Quiroz-Vásquez *et al.*, 2017) se registraron diferencias significativas en la producción de conos entre años evaluados; pero, no entre poblaciones. Se identificaron en promedio 2 841.75 semillas desarrolladas (llenas y vanas), con una media de 1 419.5 (49.97 %) de semillas llenas, con un mínimo de 898 y máximo de 1 712 (Figura 1E). Para la misma especie, Domínguez *et al.* (2016) obtuvieron 44 %; Bello (1988) calculó 40 % de semillas llenas; estos resultados son superiores a los de Morales-Velázquez *et al.* (2010) en 7.5 % en *P. leiophylla*, pero inferiores en 75.5 % a los indicados para *P. pinceana* (Quiroz-Vásquez *et al.*, 2017). De las semillas desarrolladas, 50.03 % resultaron vanas, valor inferior al de otras coníferas como *Picea mexicana* Martínez (78.3 %) (Flores-López *et al.*, 2005) y *Picea martinezii* T. F. Patterson (80.8 %) (Flores-López *et al.*, 2012).

La relación de semillas vanas sobre desarrolladas (índice de endogamia) varió de 0.39 a 0.64 (Figura 1H); valores superiores a los registrados por Márquez (2017) para *P. caribaea* var. *caribaea* Barret y Golfari (0.26) y *P. tropicalis* Morelet (0.03). Este comportamiento favorable puede deberse a que es una fuente originalmente diseñada para la producción de semilla; para *P. leiophylla* el mismo autor obtuvo un valor muy alto de índice de endogamia (0.92); lo cual es atribuible al tamaño reducido de poblaciones que genera la autopolinización (Morales-Velázquez *et al.*, 2010). Generalmente, el índice de endogamia se asocia a una baja abundancia y calidad de polen e incremento de la autofecundación; en sitios con densidades arbóreas bajas, aumenta la probabilidad de que los alelos deletéreos formen genotipos homocigóticos y provoquen el aborto de embriones, lo que incrementa la cantidad de semilla vana (Arista y Talavera, 1996).

El valor promedio para la eficiencia reproductiva de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* fue de 13 mg de semilla por gramo de cono seco; en este contexto, los árboles más

eficientes fueron los de Teococuilco, con 16.2 mg (Figura 1G). El valor fue superior, en comparación con lo consignado para *P. leiophylla*: de .49 mg de semilla g<sup>-1</sup> de cono seco (Morales-Velázquez *et al.*, 2010); en contraste, los valores son inferiores a los registrados en otras coníferas, como *P. rigida* Miller, *Picea mexicana* Martínez, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, *P. patula*, *P. pinceana*: 55.3, 23.7, 29.6, 16.35 mg g<sup>-1</sup> y 80 mg de semilla g<sup>-1</sup> de cono seco, respectivamente (Mosseler *et al.*, 2004; Flores-López *et al.*, 2005; Mápula-Larreta *et al.*, 2007; Quiroz-Vásquez *et al.*, 2017). La eficiencia reproductiva es un indicador relativo de la energía que un árbol dedica a la producción de semilla y en ella influyen el peso y número de semillas llenas por cono (Mosseler *et al.*, 2000; Owens y Fernando, 2007; Castilleja *et al.*, 2016); por ello, podría suponerse que las poblaciones de la especie estudiada en Oaxaca presentan indicios de una disminución en su eficiencia reproductiva.





A) número de conos por árbol; B) peso de conos por árbol; C) número de semilla desarrollada por árbol; D) peso de semilla desarrollada por árbol; E) semilla vana por árbol; F) semilla llena por árbol; G) eficiencia reproductiva e H) índice de endogamia. Letras distintas en las barras representan diferencias significativas (*Duncan*, 0.05) y las líneas verticales sobre las barras indican la desviación estándar.

B) **Figura 1.** Indicadores reproductivos de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana*.

A partir de las correlaciones significativas entre las variables ambientales, características de fenotipos selectos e indicadores reproductivos destaca el hecho de que los sitios más altos, con menor temperatura y mayor precipitación favorecen que los conos produzcan más semillas ( $r = 0.43$ ), de mejor calidad y que aumente la eficiencia reproductiva ( $r = 0.38$ ), además se reduce el IE ( $r = -0.38$ ) (Sáenz-Romero *et al.*, 2012). Por otra parte, valores mayores de diámetro normal, edad, volumen y productividad del sitio ( $r > 0.30$ ), se asocian con un incremento en la cantidad y calidad de los conos por árbol (Binotto *et al.*, 2010); los individuos viejos originan conos ligeros, con pocas semillas y livianas, además el índice de endogamia se favorece en los sitios de menor altitud.

## **Conclusiones**

Los fenotipos selectos de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* de cinco procedencias de Oaxaca tienen una producción de conos y eficiencia de semillas alta, con los mayores valores para la procedencia de San Pedro Yolox. Los árboles selectos presentan diferencias significativas en 11 indicadores reproductivos entre procedencias o regiones y dentro de los árboles. De esta manera, los árboles seleccionados en San Pedro Yolox presentan mejores indicadores reproductivos, con buena eficiencia reproductiva y bajo índice de endogamia; estos se asocian con excelentes condiciones ambientales de los sitios de distribución natural en Oaxaca.

## **Agradecimientos**

Al Tecnológico Nacional de México por financiar la investigación del estudiante de maestría en ciencias, mediante el proyecto de investigación: "Ensayo de progenies de especies de pinos comerciales en el estado de Oaxaca", clave: 6844.19-P.

## **Conflicto de intereses**

Los autores declaran no tener conflictos de interés en el desarrollo de la presente investigación.

## **Contribución por autor**

Rey David Aragón Peralta y Gerardo Rodríguez Ortiz: diseño y supervisión del estudio; José Jesús Vargas Hernández y Adán Hernández Hernández: logística de recolecta y beneficio de frutos y semillas; José Raymundo Enríquez-del Valle y Gisela Virginia Campos-Ángeles: revisión final del manuscrito.

## Referencias

- Arista, M. and S. Talavera. 1996. Density effect on the fruit-set, seed crop viability and seedling vigour of *Abies pinsapo*. *Annals of Botany* 77(2): 187-192. Doi:10.1006/anbo.1996.0021.
- Bello G., M. A. 1988. Potencial, eficiencia y producción de semillas en conos de *Pinus pseudostrobus* Lind. en Quinceo, municipio de Paracho Michoacán. *Ciencia Forestal* 64(13): 4-29.
- Binotto, A. F., A. D. Lúcio and S. J. Lopes. 2010. Correlation between growth variables and the Dickson quality index in forest seedlings. *CERNE* 16(4): 457-464. Doi:10.1590/S0104-77602010000400005.
- Bramlett, D. L., E. W. Belcher, G. L. DeBarr, J. L. Hertel, R. P. Karrfalt, C. W. Lantz, T. Miller, K. D. Ware and H. O. III Yates. 1977. Cone analysis of southern pines: a guidebook. Gen. Tech. Rep. SE-13. USDA For. Ser. Ashville, NC, USA. 28 p.
- Bustamante-García, V., J. A. Prieto-Ruíz, E. Merlín-Bermudes, R. Álvarez-Zagoya, A. Carrillo-Parra and J. C. Hernández-Díaz. 2012. Potencial y eficiencia de producción de semilla de *Pinus engelmannii* Carr. en tres rodales semilleros del estado de Durango, México. *Madera y Bosques* 18(3): 7-21. Doi:10.21829/myb.2012.183355.
- Castellanos A., D., C. Sáenz R., R. A. Lindi C., N. M. Sánchez V., P. Lobbit. y J. C. Montero C. 2013. Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. Ensayo de vivero. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(3): 399-411. Doi:10.5154/r.rchscfa.2013.01.002.
- Castilleja S., P., P. Delgado V., C. Sáenz-Romero and Y. Herreras D. 2016. Reproductive success and inbreeding differ in fragmented populations of *Pinus rzedowskii* and *Pinus ayacahuite* var. *veitchii*, two endemic Mexican pines under threat. *Forests* 7: 1-17. Doi:10.3390/f7080178.

Corral-Rivas, J. J. y B. Vargas-Larreta. 2013. Sistema biométrico para la planeación del manejo forestal sustentable de los ecosistemas con potencial maderable en México (2013-C01-209772): Oaxaca. Conafor-Conacyt. Oaxaca,Oax., México. 75 p.

Domínguez C., P. A., J. J. Navar C., M. Pompa G. y E. J. Treviño G. 2016. Producción de conos y semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en Nuevo León, México. *Foresta Veracruzana* 18(2): 29-36.  
<https://www.redalyc.org/pdf/497/49748829004.pdf> (18 de diciembre de 2019).

Espinoza H., M., J. Márquez R., J. Alejandro R. y H. Cruz J. 2009. Estudio de conos de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en un relicto de la localidad el paso, municipio de la Perla, Veracruz, México. *Foresta Veracruzana* 11(1): 33-38.  
<https://www.redalyc.org/pdf/497/49711999006.pdf> (1 de diciembre de 2019).

Flores-López, C., J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández. 2005. Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. *Agrociencia* 39(1): 117-126.

Flores-López, C., C. G. Geada-López, J. López-Upton y E. López-Ramírez. 2012. Producción de semillas e indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea martinicensis* T. F. Patterson. *Revista Forestal Baracoa* 31(2): 49-58. [http://www.actaf.co.cu/revistas/rev\\_forestal/Baracoa-2012-2/FAO2%202012/PRODUCCION%20DE%20SEMILLAS%20E%20INDICADORES.pdf](http://www.actaf.co.cu/revistas/rev_forestal/Baracoa-2012-2/FAO2%202012/PRODUCCION%20DE%20SEMILLAS%20E%20INDICADORES.pdf) (10 de diciembre de 2019).

González-Ávalos, J., E. García-Moya, J. J. Vargas-Hernández, A. Trinidad-Santos, A. Romero-Manzanares y V. M. Cetina-Alcalá 2006. Evaluación de la producción y análisis de conos y semillas de *Pinus cembroides* Zucc. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 12(2): 133-138.

Gómez J., D. M., C. Ramírez H., J. Jasso M. y J. López U. 2010. Variación en características reproductivas y germinación de semillas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(4): 297-304.  
<https://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/33-4/3a.pdf> (8 de diciembre de 2019).

Hernández C., O., E. O. Ramírez G. y L. Mendizábal H. 2003. Variación en semillas de cinco procedencias de *Pinus pseudostrubus* Lindl. *Foresta Veracruzana* 5 (2):23-28. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49750204.pdf> (5 de noviembre de 2019).

Kimmins, J. P. 2004. *Forest ecology. A foundation for sustainable management and environmental ethics in forestry*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ USA. 611 p.

<https://trove.nla.gov.au/work/14660075?selectedversion=NBD42245093> (28 de marzo de 2019).

Krannitz, P. G. and T. E. Duralia. 2004. Cone and seed production in *Pinus ponderosa*: a review. *Western North American Naturalist* 64(2): 208-218. <https://scholarsarchive.byu.edu/wnan/vol64/iss2/8> (11 de diciembre de 2019).

Leyva-Ovalle, Á. y J. J. Vargas-Hernández. 2018. Establecimiento de huertos semilleros asexuales regionales y ensayos de progenie de *Pinus pseudostrubus* para la evaluación genética de los progenitores. Informe final etapa 2. Proyecto 277784. Fondo Sectorial Conafor-Conacyt. México, D.F., México. 23 p.

López-Upton, J. 2002. *Pinus pseudostrubus* Lindl. In: Vozzo A., J. A. (ed.). *Tropical Tree Seed Manual*. USDA Forest Service. Washington, DC, USA. pp. 636-638.

Doi:10.1093%2Faob%2Fmch046.

Mápula-Larreta, M., J. López-Upton, J. J. Vargas-Hernández y A. Hernández-Livera. 2007. Reproductive indicators in natural populations of Douglas-fir in Mexico. *Biodiversity and Conservation* 16(3): 727-742. Doi:10.1007/s10531-005-5821-y.

Márquez G., A. V. 2007. Variación de conos y semillas de *Pinus pseudotrobis* Lindl. del Esquilón, Coacoatzintla, Veracruz, México. Tesis de maestría. Instituto de Genética Forestal. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver., México. 48 p.

- Márquez B., C. 2017. Indicadores reproductivos de dos áreas productoras de semillas en *Pinus caribaea* var. *caribaea* y *Pinus tropicalis*. Revista Científico Estudiantil Ciencias Forestales y Ambientales 2(1): 21-29. <http://cifam.upr.edu.cu/index.php/cifam/article/view/66/66> (15 de noviembre de 2019).
- Morales-Velázquez, M. G., C. A. Ramírez-Mandujano, P. Delgado-Valerio y J. López-Uptón. 2010. Indicadores reproductivos de *Pinus leiophylla* Schlttdl. et Cham. en la cuenca del río Angulo, Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 1(2): 31-38. Doi:10.29298/rmcf.v1i2.635.
- Mosseler, A., J. E. Major, J. D. Simpson, B. Daigle, K. Lange, Y. S. Park, K. H. Johnsen and O. P. Rajora. 2000. Indicators of population viability in red spruce, *Picea rubens*. I Reproductive traits and fecundity. Canadian Journal of Botany 78 (7): 928-940. Doi:10.1007/s10592-004-1850-4.
- Mosseler, A., O. P. Rajora, J. E. Major and K. H. Kim. 2004. Reproductive and genetic characteristics of rare, disjunct pitch pine populations at the northern limits of its range in Canada. Conservation Genetics 5(5): 571-583. Doi:10.1007/s10592-004-1850-4.
- Muñoz-Flores, J., J. A. Prieto R., A. Flores G., M. Alarcón B. y T. Sáenz R. 2013. Selección de árboles superiores del género *Pinus*. SAGARPA-INIFAP. México, D.F., México. 59 p.
- Owens, J. N. and D. Fernando. 2007. Pollination and seed production in western white pine. Canadian Journal of Forest Research 37: 260-275. Doi: 10.1139/X06-220.
- Quiroz-Vázquez, R. I., J. López-Upton, V. M. Cetina-Alcalá y G. Ángeles-Pérez. 2017. Capacidad reproductiva de *Pinus pinceana* Gordon en el límite sur de su distribución natural. Agrociencia 51(1): 91-104.
- Ramírez-Sánchez, S. E., J. López-U., G. García S., J. J. Vargas-Hernández, A. Hernández-Livera y Ó. J. Ayala-Garay. 2011. Variación morfológica de semillas de *Taxus globosa* Schlttdl. provenientes de dos regiones geográficas de México. Revista Fitotecnia Mexicana 34(2): 93-99.

Rodríguez L., R., R. Razo Z., J. Juárez M., J. Capulín G. y R. Soto G. 2012. Tamaño de cono y semilla en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* establecidas en diferentes suelos. Revista Fitotecnia Mexicana 35 (4): 289-298.

Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, P. Duval, R. St.-Amant, J. Beaulieu and B. A. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates of Mexico and their use in understanding climate-change impacts on the vegetation. Climatic Change 102: 595–623. Doi: 10.1007/s10584-009-9753-5.

Sáenz R., J. T., H. J. Muñoz F. y A. Rueda S. 2011. Especies promisorias de clima templado para plantaciones forestales comerciales en Michoacán. INIFAP, Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Mich., México. 213 p.

Sáenz-Romero, C., S. Aguilar-Aguilar, M. Á. Silva-Farías, X. Madrigal-Sánchez, S. Lara-Cabrera y J. López-Upton. 2012. Variación morfológica altitudinal entre poblaciones de *Pinus devoniana* Lindl. y la variedad putativa *cornuta* en Michoacán. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 3(13): 17-28.  
Doi:10.29298/rmcf.v3i13.486.

Salaya-Domínguez, J. M., J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández. 2012. Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. Agrociencia 46:519-534.

Statistical Analysis System (SAS). 2004. SAS/STAT users' guide, Version 9.1. SAS Institute Inc. Raleigh, NC, USA. 5136 p.  
[https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc\\_91/stat\\_ug\\_7313.pdf](https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/stat_ug_7313.pdf) (30 de noviembre de 2019).

Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). 2016. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015. México. pp. 143-145.  
<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282951/2016.pdf>  
(11 de enero de 2019).

Vallejos, J., Y. Badilla, F. Picado y O. Murillo. 2010. Metodología para la selección e incorporación de árboles plus en programas de mejoramiento genético forestal. *Agronomía Costarricense* 34(1): 105-119.

<https://biblat.unam.mx/hevila/AgronomiaCostarricense/2010/vol34/no1/11.pdf>

(5 de noviembre de 2019).

Viveros V., H., C. Sáenz R., J. López U. y J. J. Vargas H. 2005. Variación genética altitudinal en el crecimiento de plantas de *Pinus pseudostrobus* Lindl en campo. *Agrociencia* 39(5): 575–587.

Viveros V., H., A. R. Camarillo L., C. Sáenz R. y A. Aparicio R. 2013. Variación altitudinal en caracteres morfológicos de *Pinus patula* en el estado de Oaxaca (México) y su uso en la zonificación. *Bosque* 34(2): 173- 179. Doi: 10.4067/S0717-92002013000200006.

WorldClim. 2019. <https://worldclim.org/bioclim> (15 de marzo de 2019).



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)*, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.