

## Capacidad reproductiva de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en plantaciones de árboles de Navidad

### Reproductive capacity of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco in Christmas tree plantations

Garilizabeth Ramírez-Martínez<sup>1</sup> , Liliana Muñoz-Gutiérrez<sup>2\*</sup> , J. Jesús Vargas-Hernández<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, CP. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

<sup>2</sup>Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina, Alcaldía Coyoacán, CP. 04010. Ciudad de México, México.

<sup>3</sup>Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Km. 36.5 Carretera México- Texcoco, CP. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia: [gutierrez.liliana@inifap.gob.mx](mailto:gutierrez.liliana@inifap.gob.mx)

#### Artículo científico

Recibido: 12 de abril 2024

Aceptado: 29 de enero 2025

**RESUMEN.** *Pseudotsuga menziesii* es una conífera sujeta a protección especial, las poblaciones son pequeñas y discontinuas, con individuos aislados y dominados por otras especies; sus áreas se consideran de alto valor genético para la conservación; económicamente importante en México debido a la alta demanda como árbol de Navidad por su color, aroma y capacidad de retención del follaje. Para el establecimiento de plantaciones comerciales se debe garantizar un abasto continuo de germoplasma en cantidad y calidad. El objetivo fue determinar las características reproductivas de conos y semillas de árboles juveniles de *P. menziesii* procedentes de ensayos de inducción floral en plantaciones de árboles de Navidad establecidas en Aocolulco, Chignahuapan, Puebla. Se tomaron muestras de conos maduros en árboles que fueron tratados con AG<sub>4/7</sub> y anillado en el tronco, de ellos, se formaron dos grupos con diferente número de muestras de conos, un grupo recibió polen y el otro no. Los datos se analizaron con los procedimientos UNIVARIATE y GLM en SAS y una prueba de comparación de medias con Tukey ( $p \leq 0.05$ ). La aplicación del AG<sub>4/7</sub>, en combinación con el anillado del tronco resultan ser tratamientos efectivos para la formación de estructuras reproductivas masculinas y femeninas, con mayor número semillas llenas y mayor eficiencia de semilla (1.54 y 2.94%). La polinización artificial incrementó la proporción de semillas llenas. Se recomienda aplicar AG<sub>4/7</sub> para inducir floración temprana, incrementar la producción de conos y asistir con polinización para obtener mayor número de semillas y reducir el índice de endogamia.

**Palabras clave:** Ácido giberélico, eficiencia de semillas, endogamia, polinización, semillas llenas.

**ABSTRACT.** *Pseudotsuga menziesii* is a conifer subject to special protection, its populations are small and discontinuous, with isolated individuals and commonly dominated by other species; the areas are considered of high genetic value for conservation; economically important conifer in Mexico, due to the high demand it has as a Christmas tree due to its color, aroma and retention capacity of the foliage. For the establishment of commercial plantations, a continuous supply of germplasm in quantity and quality must be guaranteed. The objective was to determine the reproductive characteristics of cones and seeds of juvenile trees of *P. menziesii* from floral induction trials in Christmas tree plantations established in Aocolulco, Chignahuapan, Puebla. Mature cone samples were taken from trees, that were treated with AG<sub>4/7</sub> with the ringing of the trunk, of which two groups were formed with different numbers of cone samples, one group received pollen and the other did not. The data was analyzed with the UNIVARIATE and GLM procedures in SAS and a comparison test of means with Tukey ( $p \leq 0.05$ ). The application of AG<sub>4/7</sub>, in combination with the ringing of the trunk turn out to be effective treatments for the formation of male and female reproductive structure, it induced a greater number of full seeds and greater seed efficiency (1.54 and 2.94%). The artificial pollinations to increase the proportion of full seeds. It is recommended to apply AG<sub>4/7</sub> to induce early flowering, increase the production of cones and assist with pollination to increase the number of seeds and reduce the rate of inbreeding.

**Keywords:** Gibberellic acid, full seeds, inbreeding, pollination, seed efficiency.

**Como citar:** Ramírez-Martínez G, Muñoz-Gutiérrez L, Vargas-Hernández JJ (2025) Capacidad reproductiva de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en plantaciones de árboles de Navidad. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(1): e4146. DOI: 10.19136/era.a12n1.4146.

## INTRODUCCIÓN

*Pseudotsuga* es uno de los géneros de coníferas económicamente más importantes y el más utilizado como árbol de Navidad (Zavala-Chávez y Méndez-Montiel 1996) que se importa con este propósito en México. *Pseudotsuga menziesii* presenta una amplia distribución natural, desde el oeste de Canadá hasta Colorado, Nuevo México y Arizona, Estados Unidos de América (Hermann y Lavender 1999) hasta la parte centro y sierra sur de México en un intervalo de los 19° a los 55° LN (Ventura-Ríos *et al.* 2010) hasta los 17° 10' LO en el Estado de Oaxaca, México (Debreczy y Rácz 1995); con altitudes de 1 500 hasta los 3 600 m (Domínguez-Álvarez *et al.* 2004, Ventura-Ríos *et al.* 2010). Se encuentra sujeta a protección especial en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (SEMARNAT 2010) sus poblaciones naturales presentan problemas de fragmentación por cambio de uso de suelo, sobrepastoreo, tala clandestina, recolecta indiscriminada de semillas (Mápula-Larreta *et al.* 2007, Velasco-García *et al.* 2007) y presencia de plagas, afectando la producción de conos y semillas, principalmente por la avispa *Megastigmus* sp. (Guerra-de-la-Cruz *et al.* 2012).

Las poblaciones naturales del norte y centro del país son pequeñas, aisladas, con baja densidad del arbolado adulto, con problemas de polinización, dispersión y regeneración, posiblemente con efectos de endogamia (Rajora y Mosseler 2001, Cruz-Nicolás *et al.* 2008). Además, la autopolinización reduce la cantidad de semillas llenas, así como su capacidad germinativa y la tasa de crecimiento y supervivencia de las plantas (Sorensen y Campbell 1993). Debido a la problemática en sus poblaciones naturales, se han iniciado trabajos en plantaciones de árboles de Navidad para promover la formación de estructuras reproductivas en árboles jóvenes con resultados prometedores para la producción de semilla en el corto plazo (Muñoz-Gutiérrez *et al.* 2010). Con base en lo anterior, es importante evaluar el nivel de respuesta de estas prácticas sobre la producción de conos y la cantidad y calidad de las semillas producidas con estas prácticas de manejo. Por lo anterior, los indicadores reproductivos son de utilidad para determinar la viabilidad de una población, en este caso de una plantación manejada para la producción temprana de semillas. El objetivo fue evaluar la aplicación de polinización artificial sobre las características reproductivas de árboles de Navidad tratados para promover la floración temprana y posterior formación de conos y semillas. La finalidad fue el obtener una mayor cantidad de semillas con un embrión desarrollado, bajo las hipótesis de que los indicadores reproductivos de estos árboles mejoran con la aplicación de AG<sub>4/7</sub> y anillado en el tronco y que la polinización artificial incrementa el potencial de producción de semillas y eficiencia reproductiva.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización de la plantación

Los conos maduros se recolectaron en una plantación de árboles de Navidad establecida en el predio Rancho "El Encanto" (19° 54' 57" LN y 98° 11' 56" LO) a 2 780 m, ubicado en la comunidad de Aocolco, municipio de Chignahuapan, Puebla. En 2020 se realizó la inducción floral en 72 árboles con características similares de altura, diámetro y forma de la copa, de origen sexual con edad aproximada de 6-7 años. Los tratamientos para inducir floración consistieron en la aplicación de dos dosis de AG<sub>4/7</sub> (1.27 y 2.55 mg cm<sup>-2</sup>) con y sin anillado, un testigo y aplicación de anillado

solo; a partir de estos se formaron seis tratamientos producto de la combinación del AG y del anillado (T1: testigo; T2: anillado solo; T3: 1.27 mg cm<sup>-2</sup>; T4: 1.27 mg cm<sup>-2</sup> + anillado; T5: 2.55 mg cm<sup>-2</sup>; T6: 2.55 mg cm<sup>-2</sup> + anillado). Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 3 x 2 con seis repeticiones por tratamiento. Al año de aplicados los tratamientos, se recolectó polen de varios árboles no tratados que se encontraban en la misma plantación y que presentaron floración precoz. En 2021 se llevó a cabo la polinización artificial en 36 individuos que tuvieran estróbilos femeninos receptivos entre febrero y marzo.

### Recolecta de conos

En septiembre de 2021 se seleccionaron 11 árboles que presentaran conos maduros, resultado de estructuras reproductivas femeninas que se desarrollaron a partir de los diferentes tratamientos de inducción floral aplicados. De las muestras de conos maduros de estos árboles se integraron dos conjuntos de datos. El primer conjunto estuvo compuesto por los 11 árboles y una muestra de 15 conos maduros no polinizados, y seis conos que sí recibieron polen artificialmente, con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos; mientras que en el segundo conjunto el objetivo fue comparar los tratamientos de polinización artificial, se tomaron ocho árboles de los 11 y la misma muestra de conos (15 no polinizados y seis polinizados). Los conos maduros fueron colocados en bolsas de papel estraza, identificados por árbol, y se trasladaron a las instalaciones del CENID-COMEF del INIFAP en Coyoacán, Ciudad de México, para su secado a temperatura ambiente, posterior toma de datos y extracción manual de semillas.

### Obtención de variables morfológicas e indicadores reproductivos

En cada cono se determinó la longitud (cm) (LC) y ancho (cm) (AC) en la parte media con un vernier digital marca Truper (Stainless Steel). Se contabilizó el número de escamas fértiles (EF) presentes en la parte central del cono, con uno o dos óvulos funcionales o semillas desarrolladas; el número de escamas infértiles (EI) presentes en la parte del ápice y en la base del cono; número de semillas por cono (SC); el número de semillas llenas (SLL), consideradas como aquellas en las que el embrión completó su desarrollo, con un embrión normal y sin daños aparentes por insectos u hongos (Allen y Owens 1972), el número de semillas vanas (SV) éstas aparentan ser normales y con frecuencia no pueden distinguirse por su apariencia externa de las semillas llenas, pero a pesar de esto contienen solamente un remanente del tejido gametofítico o embrionario (Allen y Owens 1972), y el número de semillas plagadas (SP), aquellas que presentan daños visibles por insectos. Con estas variables y con base en la metodología generada por Bramlett *et al.* (1977) se calcularon los indicadores reproductivos mostrados en la Tabla 1.

### Análisis estadístico

Previo al análisis de los datos se probaron los supuestos de normalidad para ambos conjuntos de datos y todas las variables e indicadores, a través de la prueba de Shapiro Wilks, con los procedimientos UNIVARIATE y GLM utilizando el software de análisis estadístico SAS/PC para Windows versión 9.0 (SAS 2013). Las variables e indicadores que no tuvieron una distribución normal [(Pr<w)>0.05] fueron transformadas con la raíz cuadrada de la variable ( $\sqrt{X}$ ); después de los análisis los valores fueron re-transformados a su valor original, y se realizaron pruebas de comparación de medias con Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Para cumplir el primer objetivo y probar la primera

hipótesis, se estimó el valor promedio de los indicadores reproductivos en las muestras de conos del primer conjunto de datos.

**Tabla 1.** Descripción del indicador reproductivo y fórmulas para el género *Pinus* spp. de acuerdo con la metodología propuesta por Bramlett *et al.* (1977)

Indicador	Fórmula
Proporción de Semillas Llenas (PSLL).	$PSLL = \frac{SLL}{SD} \times 100$
Proporción de Semillas Vanas (PSV).	$PSV = \frac{SV}{SD} \times 100$
Proporción de semillas plagadas (PSP).	$PSP = \frac{SP}{SD} \times 100$
Semillas desarrolladas (SD) = Hace referencia a la totalidad de las semillas extraídas de un cono.	$SD = SV + SLL + SP$
Potencial de semilla (PS) hace referencia a la cosecha potencial de semilla por cono.	$PS = (EF \times 2)$
Eficiencia de Semillas (ES) se refiere al comportamiento de la producción de semillas debido a que compara la cosecha actual con la máxima capacidad biológica del cono.	$ES = \frac{SLL}{PS} \times 100$
Índice de Endogamia (IE) se refiere a la consanguineidad en el desarrollo embrionario, a lo que genera semillas desarrolladas de tamaño completo que están vacías (Mosseler <i>et al.</i> 2000).	$IE = \frac{SV}{SD}$

Posteriormente se realizaron análisis de varianza para determinar la variación en las características de conos y semillas de los árboles que recibieron diferentes tratamientos de estimulación floral y polinización artificial, con el procedimiento Mixed de SAS v.9 (SAS 2013). Para el primer análisis se utilizó el siguiente modelo estadístico, en el que los factores asociados con los tratamientos de inducción floral, polinización y árbol se consideraron como efectos fijos.

$$Y_{ijkl} = \mu + T_i + P_j + T_i * P_j + A_k(T_i) + A_k(T_i) * (P_j) + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde:  $Y_{ijkl}$ : Es el valor observado en la variable respuesta (indicador reproductivo) en el l-ésimo cono del k-ésimo árbol que recibió el j-ésimo tratamiento de polinización y el i-ésimo tratamiento de estimulación floral y;  $\mu$  es la media general;  $T_i$  es el efecto del i-ésimo tratamiento de estimulación floral;  $P_j$  es el efecto del j-ésimo tratamiento de polinización;  $T_i * P_j$  es el efecto de la interacción de los tratamientos de inducción floral y los de polinización;  $A_k(T_i)$ : es el efecto del k-ésimo árbol dentro del i-ésimo tratamiento de inducción floral;  $A_k(T_i) * (P_j)$ : es el efecto de la interacción del k-ésimo árbol dentro del i-ésimo tratamiento de inducción floral y el de polinización; y  $\varepsilon_{ijkl}$  es el error experimental.

También se realizó un análisis de varianza con el segundo conjunto de datos, que incluyó exclusivamente a los árboles en donde se aplicaron los tratamientos de polinización artificial (con y sin polinización), con el propósito de evaluar el efecto de la polinización sobre los indicadores reproductivos de los conos formados, sin considerar el efecto de los tratamientos de inducción floral. El modelo lineal del ANOVA usado en este caso fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + P_j + A_i * P_j + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:  $Y_{ijk}$  es el valor de la variable observada en el k-ésimo cono que recibió el j-ésimo tratamiento de polinización en el i-ésimo árbol;  $\mu$  es la media general;  $A_i$  es el efecto del i-ésimo árbol;  $P_j$  es el

efecto del  $j$ -ésimo tratamiento de polinización;  $A_i * P_j$  es el efecto de la interacción del  $i$ -ésimo árbol y el  $j$ -ésimo tratamiento de polinización; y  $\varepsilon_{ijk}$  es el error experimental.

## RESULTADOS

En todas las características de conos e indicadores reproductivos evaluados se presentó un efecto significativo ( $p < 0.0001$ ) de los tratamientos de inducción floral y de los árboles dentro de tratamientos, excepto en el número de semillas desarrolladas, en donde no hubo diferencias entre árboles. Por otro lado, la polinización artificial únicamente presentó efectos significativos ( $p < 0.0001$ ) en el número y porcentaje de semillas llenas y en la eficiencia de semillas (Tabla 2). Sin embargo, también se encontró una interacción significativa ( $p < 0.05$ ) de los tratamientos de inducción floral y la polinización artificial en el tamaño del cono, en el número y porcentaje de semillas llenas y en la eficiencia de semillas, así como una interacción significativa ( $p < 0.05$ ) de los árboles polinizados artificialmente sobre el número de escamas fértiles e infértiles, número y porcentaje de semillas llenas, potencial de semilla y eficiencia de semilla.

**Tabla 2.** Análisis de varianza de las características morfológicas e indicadores reproductivos de conos y semillas de la muestra completa de *P. menziesii*.

Factor de variación	T	P	P * T	A(T)	A(T) *(P)
Longitud de cono (cm)	*	ns	**	*	ns
Ancho de cono (cm)	*	ns	**	*	ns
Escamas fértiles (número)	*	ns	ns	*	**
Escamas infértiles (número)	*	ns	ns	*	*
Semillas por cono (número)	*	ns	ns	**	ns
Semillas llenas (número)	*	*	*	*	**
Semillas vanas (número)	*	ns	ns	**	ns
Semillas plagadas (número)	*	ns	ns	*	ns
Proporción de semillas llenas (%)	*	*	*	*	**
Proporción de semillas vanas (%)	*	ns	ns	*	ns
Proporción de semillas plagadas (%)	*	ns	ns	*	ns
Semillas desarrolladas (número)	*	ns	ns	ns	ns
Potencial de semillas (número)	*	ns	ns	**	**
Eficiencia de semillas (%)	*	*	*	*	**
Índice de endogamia	*	ns	ns	*	ns

\*Significativo con  $p < 0.0001$ ; \*\*  $p < 0.05$ ; ns = no significativo. T = tratamiento; P = polinización; A = árbol.

La longitud promedio de cono varió de 4.3 a 5.8 cm, y el ancho de 1.7 a 2.97 cm; el promedio de escamas fértiles fue de 26, con máximo de 30 y mínimo 21; mientras que el número promedio de escamas infértiles por cono fue de 8 (de 5 a 11). El potencial de semillas varió de 42 a 60 semillas, con 17 a 40 semillas desarrolladas, de las cuales 98% fueron vanas y con poca presencia de ataque

por plagas. La eficiencia de semillas fue baja (3%) y el índice de endogamia fue elevado, de 0.70 a 0.98 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Valores mínimos, máximos y promedios de las características morfológicas e indicadores reproductivos de conos y semillas de toda la población de *P. menziesii*.

Variable / Indicador	Promedio	Mínimo*	Máximo*
Longitud de cono (cm)	5	4.3	5.8
Ancho de cono (cm)	2	1.7	2.9
Escamas fértiles (número)	26	21.1	30.1
Escamas infértiles (número)	8	5.2	11.7
Semillas por cono (número)	25	13.7	40.1
Semillas llenas (número)	0	0.0	2.0
Semillas vanas (número)	24	12.6	39.9
Semillas plagadas (número)	0	0.0	4.0
Proporción de semillas llenas (%)	1	0.0	7.4
Proporción de semillas vanas (%)	90	68.6	98.1
Proporción de semillas plagadas (%)	2	0.0	23.6
Semillas desarrolladas (número)	26	17.4	40.8
Potencial de semillas (número)	52	42.3	60.1
Eficiencia de semillas (%)	0.51	0.0	3.4
Índice de endogamia	0.90	0.7	0.9

\*Valores promedio por cono

Los valores de conos y semillas con respecto al efecto de los tratamientos aplicados (AG<sub>4/7</sub> y anillado) indicaron que tanto las dimensiones de los conos como los indicadores reproductivos variaron entre los tratamientos, al respecto, los tratamientos T3 y T5 (1.27 y 2.55 mg de AG<sub>4/7</sub> sin anillado, respectivamente) produjeron conos de mayor tamaño (longitud y ancho), mayor número de escamas fértiles, número de semillas por cono y mayor potencial de semillas; sin embargo, estos tratamientos también ocasionaron un mayor número y porcentaje de semillas vanas (Tabla 4), que aquellos tratamientos con las mismas dosis de AG<sub>4/7</sub> pero con anillado en el tronco. Por otro lado, el tratamiento T6 (2.55 mg de AG<sub>4/7</sub> + anillado) indujo mayor número semillas llenas y mayor eficiencia de semilla (1.54 y 2.94%, respectivamente).

En relación con la polinización artificial, se encontró que aquellos estróbilos que no recibieron polen formaron conos más grandes con longitud promedio de 4.99 cm y ancho de 2.29 cm, con 26 escamas fértiles, 28 semillas desarrolladas, y de éstas el 90.6 % son semillas vanas con un índice de endogamia de 0.91 (Tabla 5). Mientras que los estróbilos que si recibieron polen formaron conos de menor tamaño con menor número de escamas fértiles y por lo tanto menor potencial de semillas, sin embargo, con una pequeña diferencia en la proporción de semillas llenas respecto a los no polinizados (7.54 vs. 3.38%, respectivamente) y un menor índice de endogamia (0.86) (Tabla 5).

**Tabla 4.** Promedios de las características morfológicas e indicadores reproductivos de conos y semillas entre tratamientos de los árboles *P. menziesii*.

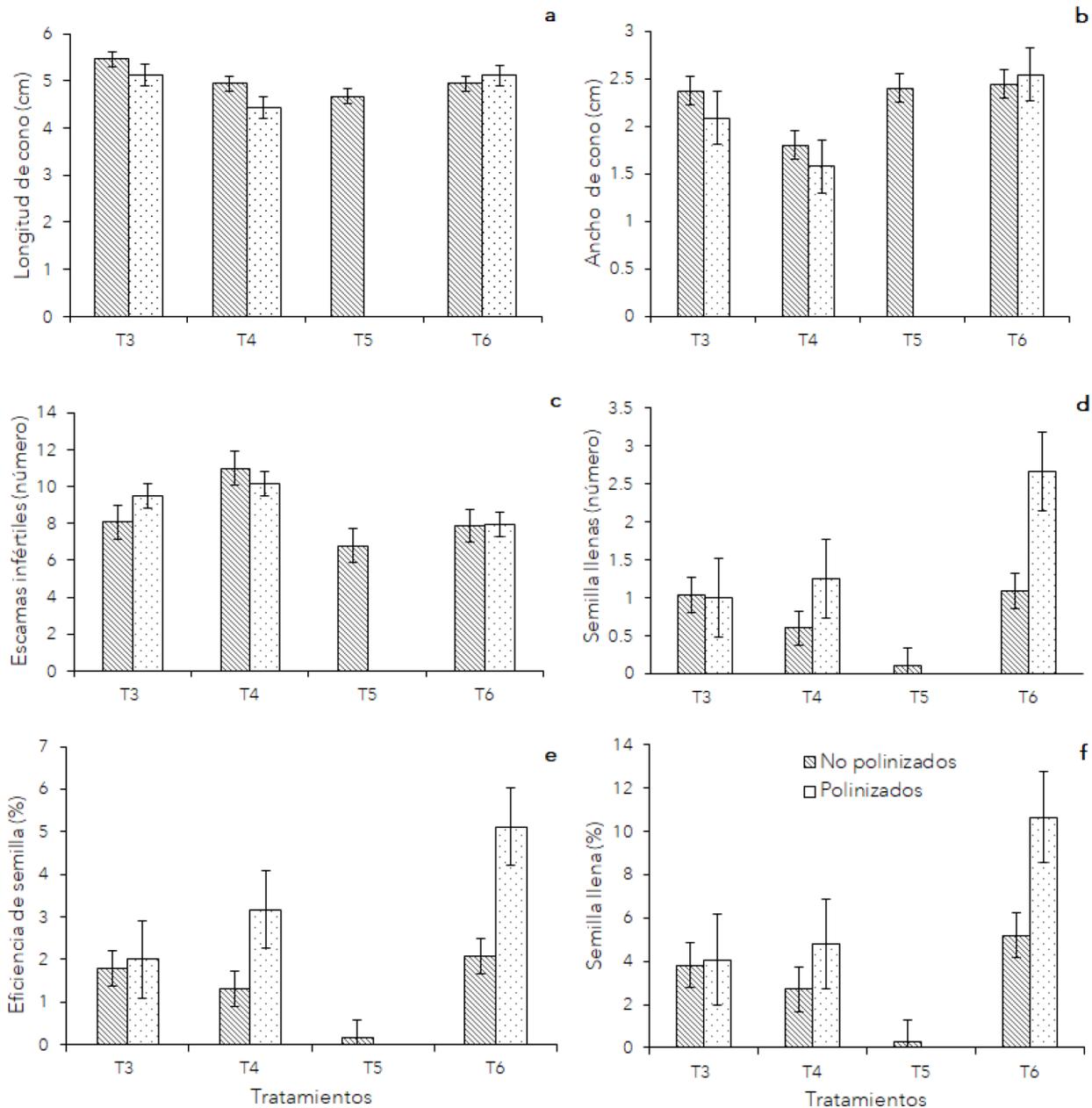
Variable / Indicador	T3	T4	T5	T6
Longitud de cono (cm)	5.36 <sup>a</sup>	4.80 <sup>b</sup>	5.36 <sup>a</sup>	4.99 <sup>ab</sup>
Ancho de cono (cm)	2.29 <sup>b</sup>	1.74 <sup>c</sup>	2.29 <sup>b</sup>	2.47 <sup>a</sup>
Escamas fértiles (número)	26.86 <sup>a</sup>	21.14 <sup>c</sup>	29.37 <sup>a</sup>	25.80 <sup>ab</sup>
Escamas infértiles (número)	8.48 <sup>ab</sup>	10.76 <sup>a</sup>	6.80 <sup>c</sup>	7.90 <sup>b</sup>
Semilla por cono (número)	27.95 <sup>ab</sup>	27.29 <sup>ab</sup>	37.50 <sup>a</sup>	21.64 <sup>b</sup>
Semillas llenas (número)	1.02 <sup>ab</sup>	0.79 <sup>b</sup>	0.10 <sup>c</sup>	1.54 <sup>a</sup>
Semillas vanas (número)	26.93 <sup>ab</sup>	26.50 <sup>ab</sup>	37.40 <sup>a</sup>	20.11 <sup>b</sup>
Semillas plagadas (número)	0.62 <sup>b</sup>	0.67 <sup>b</sup>	0.47 <sup>b</sup>	2.39 <sup>a</sup>
Proporción de semillas llenas (%)	3.87 <sup>ab</sup>	3.33 <sup>ab</sup>	0.26 <sup>b</sup>	6.82 <sup>a</sup>
Proporción de semilla vana (%)	94.20 <sup>ab</sup>	93.33 <sup>ab</sup>	98.07 <sup>a</sup>	81.81 <sup>b</sup>
Proporción de semillas plagadas (%)	1.92 <sup>c</sup>	3.34 <sup>b</sup>	1.68 <sup>c</sup>	11.37 <sup>a</sup>
Semillas desarrolladas (número)	28.57 <sup>ab</sup>	27.95 <sup>ab</sup>	37.97 <sup>a</sup>	24.04 <sup>b</sup>
Potencial de semilla (número)	53.71 <sup>ab</sup>	42.29 <sup>b</sup>	58.73 <sup>a</sup>	51.60 <sup>ab</sup>
Eficiencia de semilla (%)	1.84 <sup>b</sup>	1.85 <sup>b</sup>	0.18 <sup>c</sup>	2.94 <sup>a</sup>
Índice de endogamia	0.94 <sup>ab</sup>	0.93 <sup>ab</sup>	0.98 <sup>a</sup>	0.82 <sup>b</sup>

**Tabla 5.** Promedios de las características morfológicas de conos y semillas entre árboles polinizados y no polinizados de *P. menziesii*.

Variable/Indicador	No polinizados	Polinizados
Longitud de cono (cm)	4.99	4.94
Ancho de cono (cm)	2.29	2.19
Escamas fértiles (número)	26.11	23.90
Escamas infértiles (número)	8.33	8.90
Semilla por cono (número)	27.18	24.71
Semillas llenas (número)	0.78	1.90
Semillas vanas (número)	26.40	22.81
Semillas plagadas (número)	1.34	1.42
Proporción de semillas llenas (%)	3.38	7.54
Proporción de semilla vana (%)	90.61	86.08
Proporción de semillas plagadas (%)	6.01	6.38
Semillas desarrolladas (número)	28.52	26.13
Potencial de semilla (número)	52.23	47.79
Eficiencia de semilla (%)	1.48	3.85
índice de endogamia	0.91	0.86

Los árboles que recibieron los tratamientos T3 y T4 para inducir floración y que los estróbilos fueron polinizados, desarrollaron menor tamaño de cono (longitud y ancho) que aquellos estróbilos no polinizados, mientras que en los árboles que recibieron el tratamiento T6, la polinización aumentó ligeramente el tamaño del cono (Figura 1a y 1b). De la misma manera, la

polinización aumentó el número de escamas infértiles en los árboles que recibieron el tratamiento T3 (1.27 mg cm<sup>-2</sup>), pero no en los otros tratamientos (Figura 1c). Por otro lado, el efecto de la polinización en el aumento del número y proporción de semillas llenas, y en la eficiencia de semillas fue mucho mayor en los árboles que recibieron el tratamiento T6 y T4, que en los árboles que recibieron el tratamiento T3 (Figura 1d, 1e y 1f), es decir en los individuos que recibieron aplicación de AG<sub>4/7</sub> y anillado para estimular la floración.



**Figura 1.** Efecto de la interacción de los tratamientos de inducción floral y la polinización sobre a) longitud de cono; b) ancho de cono; c) número de escamas infértiles; d) número de semillas llenas; e) eficiencia de semillas y f) proporción de semillas llenas de *P. menziesii*.

El análisis del segundo conjunto de datos en donde se evaluó el efecto de la polinización se encontraron efectos significativos ( $p < 0.05$ ) de la polinización artificial sobre el número y proporción de semillas llenas, la eficiencia de semilla (%) y el índice de endogamia. En todos los indicadores de los conos se encontraron también diferencias significativas entre árboles, excepto en el número de semillas desarrolladas. Sin embargo, la interacción de ambos factores fue significativa ( $p < 0.05$ ) en el número de escamas fértiles e infértiles, número y proporción de semillas llenas, así como el potencial y eficiencia de semilla, lo que indica que los árboles tratados respondieron de manera diferente a la polinización artificial, con mayor respuesta en algunos de ellos.

La comparación de los valores promedio en las características morfológicas e indicadores reproductivos de conos y semillas con respecto a la polinización artificial indicaron que los conos que no recibieron polen son de mayor tamaño, con mayor número de semillas por cono, mayor número de escamas fértiles y por lo tanto mayor potencial de semillas, pero con una proporción mayor de semillas vanas e índice de endogamia; mientras que en los conos polinizados se obtuvo un mayor número y proporción de semillas llenas (1.90 y 7.54%, respectivamente), y mayor eficiencia de semillas (3.85%) (Tabla 6).

**Tabla 6.** Promedios de las características morfológicas e indicadores reproductivos de conos y semillas entre árboles polinizados y no polinizados de *P. menziesii*.

Variable/Indicador	No polinizados	Polinizados
Longitud de cono (cm)	5.09 <sup>a</sup>	4.94 <sup>a</sup>
Ancho de cono (cm)	2.32 <sup>a</sup>	2.19 <sup>a</sup>
Escamas fértiles (número)	25.70 <sup>a</sup>	23.90 <sup>a</sup>
Escamas infértiles (número)	8.38 <sup>a</sup>	8.90 <sup>a</sup>
Semilla por cono (número)	25.10 <sup>a</sup>	24.71 <sup>a</sup>
Semillas llenas (número)	1.00 <sup>b</sup>	1.90 <sup>a</sup>
Semillas vanas (número)	24.10 <sup>a</sup>	22.81 <sup>a</sup>
Semillas plagadas (número)	1.51 <sup>a</sup>	1.42 <sup>a</sup>
Proporción de semillas llenas (%)	4.33 <sup>b</sup>	7.54 <sup>a</sup>
Proporción de semilla vana (%)	88.90 <sup>a</sup>	86.08 <sup>b</sup>
Proporción de semillas plagadas (%)	6.78 <sup>a</sup>	6.38 <sup>a</sup>
Semillas desarrolladas (número)	26.61 <sup>a</sup>	26.13 <sup>a</sup>
Potencial de semilla (número)	51.41 <sup>a</sup>	47.79 <sup>a</sup>
Eficiencia de semilla (%)	1.90 <sup>b</sup>	3.85 <sup>a</sup>
índice de endogamia	0.89 <sup>a</sup>	0.86 <sup>b</sup>

## DISCUSIÓN

En huertos semilleros de *P. menziesii* establecidos en Canadá han reportado entre 30 y 40 semillas llenas por cono (Webber y Painter 1996); mientras que en poblaciones naturales del noroeste y

centro de México el número potencial de semillas por cono fue de 14 a 42 semillas (Mápula-Larreta *et al.* 2007); en el presente trabajo se determinó un potencial de semillas de 47 a 52 por cono, estas diferencias no son comparables con lo observado en huertos semilleros o en poblaciones naturales, ya que los árboles tratados fueron sexualmente inmaduros, manejados para inducir floración temprana y polinizados artificialmente. Los resultados difirieron entre árboles debido a que el manejo fue distinto por la aplicación de polen directamente en algunos estróbilos femeninos, lo que modificó el tamaño de conos, ya que aquellos árboles que recibieron el AG<sub>4/7</sub> y fueron polinizados desarrollaron estróbilos de menor tamaño, contrario a lo esperado, ya que se ha documentado que el desarrollo de conos de las coníferas tienden a ser de mayor tamaño cuando hay una polinización adecuada y por lo tanto se relaciona positivamente con un mayor número de semillas llenas (Morales-Hernández *et al.* 2022). Por otra parte, el número de semillas por conos, semillas desarrolladas y semillas llenas fue similar en aquellos estróbilos que no fueron polinizados y recibieron los mismos tratamientos de AG, esto pudo ocurrir porque el polen recolectado provenía de árboles precoces, de la misma edad y que se encontraban dentro de la misma plantación, lo que supone baja calidad y pérdida de viabilidad.

Respecto al número de semillas desarrolladas no se encontraron diferencias entre aquellos estróbilos polinizados o no, posiblemente porque aquellos árboles no polinizados recibieron polen de árboles cercanos o incluso del mismo árbol, ya que los periodos de receptividad de las estructuras femeninas y el tiempo de dispersión de polen dentro del mismo árbol están moderadamente sincronizados (0.64) y la receptividad femenina tiene mayor duración (14 días en promedio) que la dispersión de polen (5 y 6 días) (Velasco-Hernández *et al.* 2023). En cuanto a la eficiencia de semilla, esta fue mayor cuando el árbol recibió una dosis de 2.55 mg cm<sup>-2</sup> de AG<sub>4/7</sub>, anillado en el tronco y polinizado artificialmente, lo que supone que para adelantar la producción de semillas en árboles jóvenes es necesario estimular la formación de estructuras reproductivas mediante reguladores del crecimiento y asistir con polinización artificial, no obstante, es necesario investigar sobre el manejo de polen, la calidad y viabilidad para incrementar el número de semillas llenas y viables por cono.

El bajo potencial de semilla varía de acuerdo con el tamaño del cono y su posición en el árbol, ya que los conos más grandes se encuentran en la parte superior de la copa del árbol, y generalmente mientras más grande sea el cono es capaz de producir un mayor número de semillas llenas (Lyons 1956), el potencial también está relacionado con la escasez de polen, lo que, a su vez, puede deberse al tamaño reducido de las poblaciones, a niveles de endogamia altos (Morales-Vázquez *et al.* 2010), también a la periodicidad de los años semilleros (Flores-López *et al.* 2005, Flores-López *et al.* 2012); y en particular para *P. menziesii* se encontró que los eventos fenológicos de la dispersión de polen y receptividad femenina en los árboles se encuentran sincronizados y no son eventos independientes, lo que propicia la autofecundación (Velasco-Hernández *et al.* 2023).

Por otra parte, las coníferas presentan a menudo una gran cantidad de semillas vanas, resultado de la degeneración de los embriones, ocasionada por la presencia de genes recesivos letales cuya presencia aumenta por la autofecundación o cruza con parientes cercanos (Ledig *et al.* 2000), también se debe a la autopolinización y asincronía floral. Al respecto, se determinó que en promedio se encuentran 39 semillas vanas de *P. menziesii* (Mápula-Larreta *et al.* 2007). Los valores son más bajos en el presente trabajo, en donde el número de semillas vanas por cono varió de 22 a

24; esto se atribuye a varios factores, entre ellos, a la fragmentación de las poblaciones naturales, lo que provoca una reducción del arbolado adulto que participa en la producción de semillas (Mápula-Larreta *et al.* 2007). En el caso de huertos semilleros y plantaciones, el alto número de semillas vanas se debe a la edad del arbolado, al manejo, a la falta de polen, la falta de sincronía, incluso daños por insectos del género *Megastigmus* sp. (Cibrián-Tovar *et al.* 1986).

En relación con la eficiencia de semilla Mápula-Larreta *et al.* (2007) obtuvieron valores del 14 al 42% entre poblaciones del noroeste de México, mientras que las poblaciones del centro tuvieron una eficiencia menor al 25%, valores más bajos que los que se han encontrado en poblaciones naturales de la especie en Estados Unidos. Mientras que Owens *et al.* (1991) determinaron valores superiores a 40% y puede aumentar a más de 50% en huertos semilleros (Webber y Painter 1996). Una polinización insuficiente y baja viabilidad y vigor del polen pueden influir en la eficiencia en la producción de semillas por la presencia de alelos letales en individuos homocigóticos y daños biológicos (Bramlett *et al.* 1977), al respecto, Allen y Owens (1972) afirmaron que la polinización artificial en *P. menziesii* es vital para una mayor producción de semillas viables. En este trabajo, deben considerarse las condiciones en la que se trabajó, en principio los ensayos se establecieron en una plantación de árboles de Navidad, con arbolado joven, entre 6 y 7 años, sexualmente inmaduros; otro, es que a los árboles se les aplicó AG<sub>4/7</sub> y en algunos casos, el anillado en el tronco, para promover la floración temprana; la respuesta a estos tratamientos no fue de la misma intensidad en todos los árboles; además, los resultados también pueden estar asociados a la presencia de endogamia, a la falta de polen de los árboles tratados, a la calidad de polen recolectado, así como al manejo previo y durante la aplicación del polen.

Finalmente, el índice de endogamia fue de 0.76, un valor bastante elevado si se compara con otras coníferas, por ejemplo, para *Pinus hartwegii* Lindl. (0.14) (Andrade-Gómez *et al.* 2021) y similar a lo reportado en *Picea mexicana* Martínez (entre 0.73 y 0.84) (Flores-López *et al.* 2005) y *Picea martinezii* T.F. Patterson (0.75) (Flores-López *et al.* 2012); ante esta situación, es importante promover la polinización cruzada entre individuos no emparentados y entre plantaciones de árboles de Navidad para disminuir la cantidad de semillas vanas (Hernández-Anguiano *et al.* 2018). Se sabe que las poblaciones marginales y aisladas tienen mayores niveles de endogamia (Frankham 1998), lo que genera una menor capacidad reproductiva y mayor riesgo de extinción. Valores altos del índice de depresión endogámica están asociados con una alta tasa de cruzamiento entre individuos genéticamente emparentados (White *et al.* 2007). La falta de polen suele ser una limitante en la reproducción en las plantaciones, por la edad del arbolado, aún y cuando se pudo inducir la floración, la polinización artificial puede fallar, como lo determinaron Zavala-Chávez y Méndez-Montiel (1996) en *Pseudotsuga macrolepis* Flous, quienes polinizaron artificialmente y encontraron pequeñas diferencias no significativas entre conos polinizados y no polinizados. A pesar de ello, éstas son prácticas que pueden contribuir a minimizar los procesos de degradación que están sufriendo las poblaciones naturales de esta especie; se recomienda desarrollar un programa de rescate recursos genéticos que involucren acciones que permitan el intercambio de genes por medio de migración asistida al realizar plantaciones con árboles mejor adaptados y con amplia diversidad genética.

## CONCLUSIONES

A nivel individual, los árboles mostraron una amplia variación en las características morfológicas de conos y semillas evaluadas, así como en los indicadores reproductivos. La aplicación del AG<sub>4/7</sub>, en combinación con el anillado del tronco resultan ser tratamientos efectivos para la formación de estructuras reproductivas masculinas y femeninas en árboles jóvenes. Se determinó que la aplicación de los tratamientos y la aplicación de polen de manera artificial son prácticas que ayudan a incrementar el número semillas llenas y mayor eficiencia de semilla. Por lo anterior, se recomienda desarrollar un programa producción de semillas en plantaciones de árboles de Navidad ya establecidas y aplicar los tratamientos para inducir floración temprana, y asistir con polinización artificial, además de realizar investigación sobre los métodos de recolecta, manejo y almacenamiento de polen.

## AGRADECIMIENTOS

Al Sr. Porfirio Rivero propietario del Rancho Ecoturístico “El Encanto”, por las facilidades otorgadas en la realización de este estudio.

## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## LITERATURA CITADA

- Allen GS, Owens JN (1972) The life history of Douglas-fir. Canadian Forest Service. Ottawa, Canada. 139p.
- Andrade-Gómez K, Ramírez-Herrera C, López-Upton J, Jiménez-Casas M, Lobato-Ortiz R (2021) Indicadores reproductivos en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Fitotecnia Mexicana 44(2): 183-189. <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.183>
- Bramlett DL, Belcher Jr EW, DeBarr GL, Hertel GD, Karrfalt RP, Lantz CW, Miller T, Ware KD, Yates IHO (1977) Cone analysis of southern pines: A guidebook. USDA, Forest Service Southeastern Forest Experiment Station. 18p.
- Cibrián-Tovar D, Ebel BH, Yates HO III, Méndez-Montiel JT (1986) Insectos de conos y semillas de las coníferas de México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos/USDA, Forest Service. Southeastern Forest Experiment Station. 110p.
- Cruz-Nicolás J, Vargas-Hernández JJ, Ramírez-Vallejo P, López-Upton J (2008) Patrón de cruzamiento en poblaciones naturales de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en México. Agrociencia 42:367-378.
- Debreczy Z, Rác I (1995) New species and varieties of conifers from Mexico. Phytologia 78(4): 217-243. <https://doi.org/10.5962/bhl.part.11916>
- Domínguez-Álvarez FA, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Ramírez-Vallejo P, Guízar-Nolasco E (2004) Caracterización ecológica de *Pseudotsuga menziesii* en Pinal de Amoles, Querétaro: Nueva población natural en México. Anales del Instituto de Biología 75(2): 191-203.

- Flores-López C, Geada-López G, López-Upton J, López-Ramírez E (2012) Producción de semillas e indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea martinezii* T.F. Patterson. *Revista Forestal Baracoa* 31(2): 49-58.
- Flores-López C, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ (2005) Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. *Agrociencia* 39(1): 117-126.
- Frankham R (1998) Inbreeding and extinction: island populations. *Conservation Biology* 12(3): 665-675.
- Guerra-de-la-Cruz V, López-Domínguez JC, López-Upton J, Bautista-Sampayo C, Hernández-García L (2012) Estructura silvícola de poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en Tlaxcala y Puebla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 3(13): 74-75.
- Hermann KR, Lavender DP (1999) Douglas-fir planted forests. *New Forests* 17: 53-70. <https://doi.org/10.1023/A:1006581028080>
- Hernández-Anguiano LA, López-Upton J, Ramírez-Herrera C, Romero-Manzanares A. (2018) Variación en germinación y vigor de semillas de *Pinus cembroides* y *P. orizabensis*. *Agrociencia* 52(8): 1161-1178.
- Ledig FT, Bermejo VB, Hodgskiss PD, Johnson DR, Flores-López C, Jacob CV (2000) The mating system and genetic diversity in Martínez spruce, an extremely rare endemic of México's Sierra Madre Oriental: an example of facultative selfing and survival in interglacial refugia. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1-9. <https://doi.org/10.1139/x00-052>
- Lyons LA (1956) The seed production capacity and efficiency of red pine cone (*Pinus resinosa* Ait.). *Canadian Journal of Botany* 34(1): 27-36. <https://doi.org/10.1139/b56-003>
- Mápula-Larreta M, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ, Hernández-Livera A (2007) Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de abeto Douglas en México. *Biodiversidad y Conservación* 16: 727-742.
- Morales-Hernández J, Gómez-Romero M, Sánchez-Vargas NM, Velázquez-Becerra C, Cruz-de-León J, Ambriz E (2022) Producción de semillas e indicadores reproductivos de *Pinus martinezii* de dos procedencias del estado de Michoacán, México. *Bosque* 43(3): 221-229. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002022000300221>
- Morales-Vázquez MG, Ramírez-Mandujano CA, Delgado-Valerio P, López-Upton J (2010) Indicadores reproductivos de *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham. en la cuenca del Río Angulo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2): 31-38.
- Mosseler A, Major JE, Simpson JD, Daigle K, Lange YS, Park KH, Rajora OP (2000) Indicators of population viability in red spruce, *Picea rubens*. I. Reproductive traits and fecundity. *Canadian Journal of Botany* 78: 928-940. <https://doi.org/10.1139/b00-065>
- Muñoz-Gutiérrez L, Vargas-Hernández JJ, López-Upton J, Gutiérrez-Rangel N (2010) Inducción de estructuras reproductivas en *Pseudotsuga menziesii*. *Agrociencia* 44 (7): 835-847.
- Owens JN, Colangeli AM, Morris SJ (1991) Factors affecting seed set in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Canadian Journal of Botany* 69(2): 229-238. <https://doi.org/10.1139/b91-033>
- Rajora OP, Mosseler A (2001) Challenges and opportunities for conservation of forest genetics resources. *Euphytica* 118: 197-212. <https://doi.org/10.1023/A:1004150525384>
- SAS (2013) Statistical Analysis Software. Users Guide Statistics Version 9.4. SAS Institute Inc., Cary, N. C. 521p.
- SEMARNAT (2010) Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. Diciembre de 2010. México. 78p.
- Sorensen FC, Campbell RJ (1993) Seed weight-seedling size correlation in coastal Douglas-fir: genetic and environmental components. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 275-285. <https://doi.org/10.1139/x93-037>

- Velasco-García MV, López-Upton J, Ángeles-Pérez G, Vargas-Hernández J, Guerra-de-la-Cruz V (2007) Dispersión de semillas de *Pseudotsuga menziesii* en poblaciones del centro de México. *Agrociencia* 41: 121-131.
- Velasco-Hernández SI, Muñoz-Gutiérrez L, Vargas-Hernández JJ, Castelán-Lorenzo M (2023) Fenología de estructuras reproductivas de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14(80): 80-104. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i80.1395>
- Ventura-Ríos A, López-Upton J, Vargas-Hernández JJ, Guerra-de-la-Cruz V (2010) Caracterización de poblaciones de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en el centro de México. Implicaciones para su conservación. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33(2): 107-116.
- Webber JE, Painter RA (1996) Douglas-fir pollen management manual. Province of British Columbia. Ministry of forest Research Program. Victoria, BC, Canada. 91p.
- White TL, Adams WT, Neale DB (2007) *Forest Genetics*. CAB International. London, UK. 682p.
- Zavala-Chávez F, Méndez-Montiel JT (1996) Factores que afectan la producción de semillas en *Pseudotsuga macrolepis* Flous. en el Estado de Hidalgo, México. *Acta Botanica Mexicana* 36: 1-13.