



PARÁMETROS REPRODUCTIVOS DE *Pinus montezumae* LAMBERT VAR. *montezumae* EN LA MALINCHE, TLAXCALA, MEXICO

REPRODUCTIVE PARAMETERS OF *Pinus montezumae* LAMBERT VAR. *montezumae* IN LA MALINCHE, TLAXCALA, MEXICO

Itzel Rocío Cahuantzi-Tlacotzi¹, Oscar G. Vázquez-Cuecuecha^{1*},
Javier López-Upton², Elizabeth García-Gallegos¹ y Vidal Guerra de la Cruz³

¹Universidad Autónoma de Tlaxcala, Centro de Investigación en Genética y Ambiente, Maestría en Ciencias en Sistemas del Ambiente, Ixtacuixtla, Tlaxcala, México. ²Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales, Montecillo, Estado de México, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Sitio Experimental Tlaxcala, Chiautempan, Tlaxcala, México.

*Autor de correspondencia (oscar.vazquez@docente.uatx.mx)

RESUMEN

Los factores de disturbio en la montaña de La Malinche, como la tala clandestina, incendios forestales y plagas pueden inducir fragmentación del hábitat, reducción de la variabilidad genética y limitar la regeneración natural de especies arbóreas, por lo que se requiere explorar y monitorear sus efectos a través de la producción de semillas viables en la zona. El objetivo del presente estudio fue caracterizar la producción de semillas de *Pinus montezumae* y su relación con factores ambientales en cuatro rodales de bosque natural de La Malinche, Tlaxcala, México. Se evaluó el estado reproductivo de los árboles mediante el análisis de conos y producción de semillas. Los resultados mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre árboles dentro de cada rodal y entre rodales en los parámetros reproductivos de conos y semillas, con excepción del número de escamas por cono. El promedio de producción potencial de semillas fue de 191 semillas por cono, de las cuales 36 % fueron semillas llenas, lo que equivale a 69 semillas por cono. Ixtenco mostró la mayor eficiencia reproductiva con 41.5 % de semillas viables. La producción promedio de semillas llenas se vio afectada en 33 % por óvulos abortados, 7 % por daño por plagas y 24 % por semillas vanas. Los árboles de San Bartolomé presentaron el mayor grado de endogamia (0.40 en promedio), lo cual se reflejó en una baja proporción de semillas llenas (30.5 % en promedio). Los parámetros reproductivos presentaron de baja a moderada asociación ($r = 0.01-0.66$) con las variables ambientales de altitud, temperatura, precipitación y de suelos.

Palabras clave: *Pinus montezumae*, eficiencia reproductiva, endogamia, producción de semillas, rodales naturales.

SUMMARY

Disturbance factors in the mountain of La Malinche, such as illegal logging, forest fires and pests can induce habitat fragmentation, reduce genetic variability and limit natural regeneration of tree species; thus, it is necessary to explore and monitor their effects through the production of viable seeds in the area. The aim of this study was to characterize seed production of *Pinus montezumae* and its relationship with environmental factors in four stands of natural forests of La Malinche, Tlaxcala, Mexico. The reproductive status of the trees was evaluated by cone analysis and seed production. Results showed significant differences ($P \leq 0.05$) between trees within each stand and between stands reproductive parameters of cones and seeds, except for the number of scales per cone. The average potential seed production was 191 seeds per cone, of which 36 % were full seeds, equivalent to 69 seeds per

cone. Ixtenco showed the highest reproductive efficiency with 41.5 % of viable seeds. The average production of full seeds was affected by 33 % aborted ovules, 7 % by pest damage and 24 % by empty seeds. San Bartolomé trees had the highest degree of inbreeding (0.40 on average), which was reflected in a low proportion of full seeds (30.5 % on average). Reproductive parameters showed low to moderate association ($r = 0.01-0.66$) with the environmental variables altitude, temperature, precipitation and soil.

Index words: *Pinus montezumae*, inbreeding, natural stands, reproductive efficiency, seed production.

INTRODUCCIÓN

Pinus montezumae Lamb. es una de las especies más aprovechadas en México, con alto uso en programas de reforestación, conservación, protección de cuencas hidrográficas y restauración de suelos (Flores y Moctezuma-López, 2021); además, su madera es altamente valorada en la fabricación de muebles y materiales para construcción (Zamora-Campos *et al.*, 2007); no obstante, las poblaciones de esta especie han disminuido, lo que ha afectado sus funciones ecológicas en el ecosistema (Cagnolo y Valladares, 2011).

La reducción de la densidad del arbolado limita la disponibilidad de polen, lo que incrementa la posibilidad de autofecundación, y con ello, la consanguinidad entre los individuos. Esta situación puede generar procesos de depresión endogámica que afectan la producción y calidad del germoplasma viable, además de propiciar la pérdida de diversidad genética (Mosseler *et al.*, 2000). Aunado a esto, las alteraciones de temperatura y precipitación en fechas en que los árboles desarrollan las estructuras reproductivas pueden alterar la dispersión del polen debido a que causan asincronía en la formación de estróbilos femeninos y masculinos, lo cual propicia la producción de semillas vanas y disminuye el establecimiento de nuevas plantas (Kremer *et al.*, 2012).

En el Parque Nacional La Malinche, la población de *P. montezumae* var. *montezumae* está afectada por el cambio de uso de suelo, la tala clandestina, el pastoreo, los incendios y la creciente presión demográfica (Cruz *et al.*, 2022); también está perjudicada por plagas como *Dendroctonus mexicanus* Hopkins (López, 2023). Si bien recientemente se reportó una buena producción de semilla de esta conífera en los municipios de San Bartolomé, San Pedro, Ixtenco y Altamira de La Malinche (Herrera-Hernández *et al.*, 2024a), no se ha evaluado la producción de semilla en rodales afectados por el descortezador, por lo que resulta importante analizarla. La conservación de las especies arbóreas depende en mucho de la producción de semilla (Santos *et al.*, 2018); por ello, el objetivo del presente estudio fue caracterizar la producción de semillas de *P. montezumae* y su relación con los factores ambientales de cuatro rodales en el bosque natural de La Malinche, Tlaxcala, México, bajo las siguientes hipótesis: 1) las características de los conos y semillas presentan variación significativa entre y dentro de los rodales, y 2) la variación de los parámetros reproductivos tiene alta correlación con los factores ambientales y edáficos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material y área de estudio

En el periodo invernal de 2020 (enero-febrero) se seleccionaron 10 árboles por rodal, libres de plagas y enfermedades, con separación mínima de 50 m entre árboles (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021) en cuatro rodales en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México (Cuadro 1) para evaluar la producción de semilla tras el ataque por descortezador.

La edad de cada árbol fue determinada a través del conteo de los anillos de crecimiento de virutas obtenidas con un taladro Pressler (marca Suunto, Vantaa, Finlandia) de 12 mm de diámetro, a 1.30 m altura (Zamora-Campos *et al.*, 2007), con lo que se obtuvo la edad promedio por

rodal. La densidad arbórea para la especie se estimó considerando individuos con diámetro normal > 5 cm, en una circunferencia de 400 m², a partir de cada árbol seleccionado que funcionó como centro (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021).

Análisis de suelo

Una muestra simple de suelo fue tomada con orientación norte, a 3 m de la base de cada árbol, a una profundidad de 0-30 cm. Las muestras se secaron y tamizaron con una malla de 2 mm (Montinox®, México). El pH se determinó con una relación suelo:agua 1:2 (p/v) con un potenciómetro (Conductronic®, Puebla, México), el fósforo disponible con el método de Bray y Kurtz utilizando un espectrofotómetro de UV (Hach®, Loveland, Colorado, EUA), y el contenido de nitrato mediante extracción con KCl 2N (Analizador por inyección Perkin Elmer®, Waltham, Massachusetts, EUA) de acuerdo con la norma NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las determinaciones se realizaron en el Laboratorio de Recursos Naturales del CIGyA-UATx.

Análisis de conos

Se seleccionaron 10 conos de cada uno de los 10 árboles muestreados por rodal. La longitud y diámetro (mm) de conos se midieron con un calibrador digital (Truper®, México). Posteriormente, se diseccionaron los conos para cuantificar el número total de escamas y clasificarlas en fértiles e infértiles (Flores-López *et al.*, 2005), considerando la huella de la semilla en las escamas. Para determinar el peso seco (g) de los conos diseccionados, estos se colocaron en un horno de secado a 70 °C durante 48 h (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021). El análisis de conos y producción de semilla se realizó siguiendo las metodologías descritas por Mosseler *et al.* (2000) y Capilla-Dinorin *et al.* (2021).

Se determinaron las variables 1) potencial de producción de semilla (POTPS) como el número de escamas fértiles ×

Cuadro 1. Información geográfica, climatológica y densidad de árboles de los rodales de *Pinus montezumae* Lamb. en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Rodal	Latitud N	Longitud O	Altitud (msnm)	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)	Edad promedio	Densidad (árboles maduros ha ⁻¹)
San Bartolomé	19°16'13"	98°05'32"	2850	12.2	853	54	121
San Pedro	19°15'34"	98°05'34"	2900	11.9	852	54	186
Ixtenco	19°14'14"	97°58'13"	2950	11.7	797	58	104
Altamira	19°16'42"	97°59'27"	3000	11.4	809	70	171

2; 2) semillas desarrolladas (TSDS) como la sumatoria del número de semillas llenas, vanas y dañadas (aquellas que presentaron cubierta externa, con o sin embrión (Nonogaki, 2017); 3) proporción de semillas llenas (eficiencia de producción de semillas llenas), vanas, dañadas por insectos y óvulos abortados, este último obtenido mediante la división del valor de cada parámetro sobre el POTPS multiplicado $\times 100$; esta clasificación de la semilla se realizó observando la semilla de cada cono; 4) índice de endogamia (IENDO) mediante la proporción de semillas vanas respecto al TSDS; 5) eficiencia reproductiva (EREP) considerando el peso de las semillas llenas de un cono sobre el peso seco del cono (g), con una balanza analítica (Chyo Balance Corporation®, Brooklyn, New York, EUA); 6) peso promedio de tres semillas (mg) (PESEM) de cada cono evaluado con la balanza analítica; 7) total de semillas por kilogramo obtenido mediante la relación de 1000 g de semilla sobre el peso promedio de la semilla; 8) conos requeridos para obtener un kg de semilla, obtenido con la relación semillas por kg/número de semillas por cono.

Análisis estadístico

Los datos se sometieron a la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) ($P > 0.05$) y homogeneidad de varianza (Levene) ($P > 0.05$), después a un análisis de varianza. Para variables que no cumplieron con los supuestos, los datos fueron transformados a rangos en el paquete estadístico InfoStat, Versión 2020 para determinar las diferencias entre rodales y dentro de rodales con $P \leq 0.05$, bajo el siguiente modelo lineal de efectos mixtos considerando como efecto fijo los rodales y aleatorio los árboles:

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + A_{j(i)} + e_{ijk}$$

Donde: Y_{ijk} es la observación del k -ésimo cono del j -ésimo árbol del i -ésimo rodal, μ es la media poblacional, R_i es el efecto de la i -ésimo rodal, $A_{j(i)}$ es el efecto del j -ésimo árbol dentro del i -ésimo rodal, y e_{ijk} es el error experimental de muestreo por el cono analizado.

Posteriormente, se realizó una prueba de comparación de medias Tukey ($P \leq 0.05$) y se obtuvieron correlaciones para relacionar las variables de conos y semillas con los factores ambientales (altitud, temperatura, precipitación, pH, fósforo y NO_3); el coeficiente de correlación de Pearson ($P \leq 0.05$) para aquellas variables con distribución normal y correlaciones de Spearman para las que no presentaron dicha distribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Morfología del estróbilo femenino

El promedio de la longitud y diámetro de los conos cerrados de *P. montezumae* en La Malinche fue de 118 y 40 mm, respectivamente con diferencias entre y dentro de rodales ($P \leq 0.05$). Para la misma especie se ha reportado un diámetro promedio del cono de 49 mm (Rodríguez, 1997), valor muy cercano al encontrado en el presente estudio, y una longitud del cono de 120 a 150 mm en el centro de México (Perry, 1991). La longitud promedio de cono encontrada en la presente investigación fue cercana al valor inferior reportado en el centro del país, las diferencias pueden deberse a las condiciones ambientales (temperatura y humedad) de los rodales, así como a los genotipos (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021; Sáenz-Romero *et al.*, 2016). Se observaron diferencias significativas en el peso seco del cono entre y dentro de los rodales ($P = 0.0001$). San Bartolomé presentó los conos más ligeros e Ixtenco los de mayor peso, aunque este último no se diferenció de los de Altamira (Cuadro 2). En cuanto al ETOT, no se detectaron diferencias significativas entre los rodales ($p = 0.93$), los valores oscilaron entre 160 y 164 escamas; sin embargo, sí existieron diferencias entre árboles dentro de rodales ($p = 0.0001$), las diferencias pueden deberse a efectos genéticos, ya que los factores ambientales de cada uno de los árboles son similares debido a su cercanía. Para las EFERT, la diferencia fue significativa entre rodales ($p = 0.0012$) y dentro de cada rodal ($p = 0.0001$), con un promedio de 95 escamas fértiles, con variación entre rodales de 91 a 102 escamas fértiles (Cuadro 2).

Parámetros reproductivos

El POTPS promedio por cono de los cuatro rodales fue de 191 semillas, cifra menor al reportado en una población de *P. montezumae* en Michoacán con 219 semillas/cono (Delgado-Valerio, 1994), este parámetro pudiera ser afectado por el tamaño del cono, como lo reportaron Capilla-Dinorin *et al.* (2021) para *Pinus chiapensis*, y se evidencia en La Malinche ($r = 0.65$, $p = 0.001$); sin embargo el POTPS representa la capacidad biológica máxima del estróbilo femenino para producir semillas (Mosseler *et al.*, 2000), el cual no está definido por el tamaño. El rodal de Ixtenco presentó el potencial más alto (204 semillas) y el menor el de San Pedro con 183 semillas potenciales.

Otras especies del género *Pinus* presentan menor potencial de producción de semillas, como *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. con 53 y 61 semillas potenciales (Delgado-Valerio, 1994; Morales-Velázquez *et al.*, 2010), *P. cooperi* Blanco de 64 a 92 semillas potenciales (Martínez *et al.*, 2020), *P. chiapensis* (Martínez) Andresen,

Cuadro 2. Media \pm error estándar y comparación de medias de las características de conos y semillas de *Pinus montezumae* en cuatro rodales naturales del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Características	Significancia		Rodales			
	Rodal	Árbol	Ixtenco	Altamira	San Bartolomé	San Pedro
PESEC (g)	0.0001	0.0001	56.3 \pm 1.25a	56.0 \pm 1.92ab	47.4 \pm 1.32c	53.6 \pm 2.27bc
LONC (mm)	0.0023	0.0001	126.8 \pm 1.4a	128.4 \pm 1.7a	104.6 \pm 1.7b	111.2 \pm 2.2b
DIAMC (mm)	0.0001	0.0001	43.1 \pm 0.6a	39.3 \pm 0.4b	38.9 \pm 0.4b	40.3 \pm 0.4b
ETOT	0.9280	0.0001	164.0 \pm 1.7a	163.0 \pm 1.8a	159.8 \pm 2.3a	160.5 \pm 2.9a
EFERT	0.0012	0.0001	102.3 \pm 2.0a	94.4 \pm 2.0b	94.4 \pm 2.0b	91.5 \pm 2.0b
TSDDES	0.0091	0.0001	163.5 \pm 5.4a	142.7 \pm 4.8b	106.3 \pm 4.0c	108.9 \pm 3.4c
SLLENA (%)	0.0001	0.0001	41.54 \pm 1.6a	37.06 \pm 1.6b	30.50 \pm 1.6c	35.13 \pm 1.6b
SVANA (%)	0.0001	0.0001	26.21 \pm 1.1a	27.33 \pm 1.1a	22.44 \pm 1.1b	20.23 \pm 1.2b
SDAÑA (%)	0.0001	0.0001	10.76 \pm 0.6a	9.56 \pm 0.6a	3.18 \pm 0.6c	5.20 \pm 0.6b
POTPS	0.0012	0.0001	204.66 \pm 4.0a	188.78 \pm 4.0b	188.72 \pm 4.0b	182.96 \pm 4.0b
OABOR (%)	0.0001	0.0001	21.52 \pm 0.9c	26.07 \pm 0.9c	43.86 \pm 0.9a	39.45 \pm 0.9b
IENDO	0.0279	0.0001	0.33 \pm 0.02c	0.38 \pm 0.02ab	0.40 \pm 0.02a	0.35 \pm 0.02bc
PUSEM (mg)	0.0001	0.0016	23 \pm 0.1ab	24 \pm 0.1b	23 \pm 0.1ab	22 \pm 0.1a
Sem kg ⁻¹	0.0001	0.0001	43746 \pm 1399ab	42586 \pm 1399ab	42185 \pm 1406b	48219 \pm 1428a
EREP (mg g ⁻¹)	0.0001	0.0001	0.04 \pm 0.01 a	0.03 \pm 0.01a	0.03 \pm 0.01a	0.03 \pm 0.01a

Medias con letras iguales en las columnas no son estadísticamente diferentes ($P \leq 0.05$). PESEC: peso seco del cono, LONGC: longitud de cono, DIAMC: diámetro del cono, ETOT: escamas totales, EFERT: número de escamas fértiles, TSDDES: número total de semillas desarrolladas, SLLENA: semillas llenas. Eficiencia de producción de semillas (proporción de semillas llenas), SVANA: semillas vanas, SDAÑA: semillas dañadas por insectos, POTPS: potencial de producción de semillas, OABOR: óvulos abortados, IENDO: índice de endogamia, PUSEM: peso unitario de la semilla, EREP: eficiencia reproductiva.

de 76 a 103 semillas potenciales (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021), *P. pinceana* Gordon de 53 a 64 semillas (Quiroz-Vázquez *et al.*, 2017) y *P. martinezii* Larsen de 80 a 130 semillas potenciales (Morales-Hernández *et al.*, 2022); pero menores al de *P. pseudostrobus* Lindl. con 266 semillas potenciales; para esta variable, los valores diferentes entre especies se deben a las características genéticas propias de la especie (Aragón *et al.*, 2020).

El número promedio del TSDDES por cono fue de 130 semillas, con diferencia entre y dentro de rodales ($P \leq 0.05$). El valor más alto se registró en Ixtenco y el menor en San Bartolomé (Cuadro 2). El número promedio de semillas desarrolladas por cono encontrado en el presente estudio fue similar al reportado para esta especie en las poblaciones de Tlaxcala, Puebla y Estado de México, 132 semillas desarrolladas (Herrera-Hernández *et al.*, 2024a), pero menores a los promedios reportados en otras

poblaciones de la misma especie (144 y 172 semillas desarrolladas) (Delgado-Valerio, 1994; Rodríguez, 1997) de la región centro de México y de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Las diferencias entre los rodales en este estudio es evidencia que los rodales pudieran presentar problemas reproductivos (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021).

El porcentaje promedio de semillas llenas en *P. montezumae* fue de 36 % del POTPS, valor inferior al 68 % de semillas llenas reportado por Delgado-Valerio (1994) en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. Herrera-Hernández *et al.* (2024a) refieren 24 % para poblaciones de Tlaxcala, Puebla y Estado de México. En este estudio el porcentaje de semillas llenas por cono varió entre 30 % en San Bartolo, 35 % en San Pedro, 37 % en Altamira y 41 % en Ixtenco. La variación en la producción de la semilla desarrollada puede estar relacionada con la

cantidad de árboles maduros de la especie en cada rodal, lo que influye directamente en la cantidad y disponibilidad de polen (Andrade-Gómez *et al.*, 2021).

La densidad de arbolado para *P. montezumae* en este estudio varió entre 104 y 186 árboles maduros/ha en Ixtenco y San Pedro, respectivamente (Cuadro 1); sin embargo, Ixtenco con la menor densidad de individuos/ha presentó el mayor porcentaje de SLENA y el menor IENDO, en relación con el resto de los rodales, lo que indica que la densidad arbórea no es determinante en la producción de semilla y que no existen problemas de endogamia.

La proporción promedio de semillas vanas en La Malinche fue de 24 % (47 semillas vanas/cono) con diferencias significativas entre y dentro de rodales (Cuadro 2), valor muy cercano al dato que asociaron Ledig *et al.* (2002) y Mápula-Larreta *et al.* (2007) con una polinización cruzada eficiente (valores por debajo del 20 % en rodales naturales con árboles maduros y poco emparentados). En la región centro de México, Rodríguez (1997) reportó 68 semillas vanas para la misma especie, valor superior al obtenido en este estudio, lo que podría indicar que los árboles dentro de los rodales tienen un grado de parentesco. A pesar de que Ixtenco, el rodal de menor densidad poblacional, presentó número mayor de semillas vanas, no se puede atribuir este parámetro a la baja densidad poblacional, pues no existió una correlación significativa entre estas variables ($r = -0.03$, $p = 0.095$), de tal forma que el número mayor de semillas vanas probablemente se pueda atribuir a la falta de polen en el periodo de receptividad de los estróbilos femeninos, problema común en los pinos (Mosseler *et al.*, 2000).

El índice de endogamia en este estudio varió de 0.33 a 0.40 (Ixtenco y San Bartolomé respectivamente) con diferencias significativas ($p = 0.0279$) (Cuadro 2), y valor promedio de 0.36, inferior a lo reportado por Herrera-Hernández *et al.* (2024a) para la misma especie (0.43). Este fenómeno ha sido documentado en poblaciones pequeñas o fragmentadas, como ocurre en *Picea mexicana*, donde los coeficientes de endogamia son de 0.73 a 0.84 (Mendoza-Maya *et al.*, 2015). La endogamia implica un incremento en la frecuencia de genes letales y la muerte del embrión; es decir, favorece la aparición de desórdenes genéticos (Mosseler *et al.*, 2000; Piñeira *et al.*, 2015) la pérdida de vigor y fecundidad (Mosseler *et al.*, 2000), lo que sugiere una menor variabilidad genética y un mayor número de individuos homocigóticos emparentados, incrementando así la probabilidad de heredar alelos asociados con defectos genéticos (Piñeira *et al.*, 2015). Este estudio permitió identificar que en los rodales aún no es un problema grave, aunque se deben monitorear más rodales y en diferentes momentos para asegurar que la situación no cambie.

En los cuatro rodales evaluados en La Malinche se encontró en promedio un 33 % de óvulos abortados, con diferencias significativas ($p = 0.0001$) entre estos. En los rodales de San Bartolomé e Ixtenco se registraron promedios de 43 % y 21 %, respectivamente. En otros estudios para la misma especie, se ha reportado un promedio de 21.5 % en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán (Delgado-Valerio, 1994) y 42 % en poblaciones de Tlaxcala, Puebla y Estado de México (Herrera-Hernández *et al.*, 2024a), por lo que el promedio de óvulos abortados encontrado en el presente estudio fue intermedio en relación con lo encontrado en los otros dos estudios. En especies como *P. leiophylla* se reportó un 72.9 % en Michoacán, México (Morales-Velázquez *et al.*, 2010), para *P. pseudostrobus* se registró 60 % en la Sierra Norte de Oaxaca, México (Aragón-Peralta *et al.*, 2020) y 57.4 % en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán (Delgado-Valerio, 1994). Lo anterior es atribuible a la baja producción o dispersión de polen en estos rodales (Mosseler *et al.*, 2000), como parte del efecto de poblaciones pequeñas en coníferas, lo que explica la alta cantidad de óvulos abortados (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021), además de una posible falta de sincronización (Mosseler *et al.*, 2000).

Otro factor que redujo la producción y la disponibilidad de semillas llenas fue la presencia del díptero *Cecidomya bisetosa* Gagné, cuya larva dañó la semilla durante el desarrollo. En los rodales del Parque Nacional La Malinche se detectaron diferencias significativas en cuanto a los daños causados por el insecto (Cuadro 2). El daño promedio fue de 7.17 %, con mayor afectación en Ixtenco (10.76 %) y menor en San Bartolomé (3.18 %). Rodríguez (1997) determinó un porcentaje más alto de daño (17 %) en semilla de *P. montezumae* en esa época en la región centro de México, mientras que otros trabajos reportan menor afectación para la especie en otras poblaciones; por ejemplo, Delgado-Valerio (1994) reportó 0.001 % de daño en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán y Herrera-Hernández *et al.* (2024a) 2 % en Tlaxcala, Puebla y Estado de México.

Con respecto a la eficiencia reproductiva, los rodales no presentaron diferencias significativas (Cuadro 2), con un promedio de 0.0325 mg g⁻¹, energía que *P. montezumae* invierte para producir una semilla en el Parque Nacional La Malinche; no obstante, el rodal de Ixtenco resultó el menos eficiente, al requerir una mayor cantidad de energía (0.04 mg g⁻¹). Las semillas con mayor peso fueron las de Altamira (24 mg/semilla), con una inversión de 0.03 mg g⁻¹, lo que indica mayor eficiencia en la asignación de recursos reproductivos. El-Kassaby y Cook (1994) indicaron que existe una relación positiva entre la energía invertida en reproducción y la formación de semillas llenas en

Pseudotsuga menziessii (Mirb.) Franco, aspecto que no se observó en el presente estudio, ya que la mayor proporción de semillas llenas está relacionada con la polinización entre árboles no emparentados (Mosseler *et al.*, 2000).

Para las semillas por kilogramo, se observaron diferencias significativas entre rodales ($p = 0001$) (Cuadro 2). El mayor número se obtuvo en San Pedro con 48,219 semillas kg^{-1} . Esta cifra es inferior a la reportada para *P. montezumae* en la región centro de México por Rodríguez (1997) con 56,000 semillas kg^{-1} . Esta variable está relacionada con el peso unitario de la semilla. Las semillas más pesadas, como las de Altamira (Cuadro 2), pueden proporcionar una ventaja competitiva durante el primer año de desarrollo al producir plántulas más vigorosas (Liu *et al.*, 2012; Taliman *et al.*, 2019); en contraste, las semillas más ligeras, como las de San Pedro, contienen menores reservas (carbohidratos y lípidos), lo que puede afectar la velocidad de germinación y la fase inicial del crecimiento de la plántula (Herrera-Hernández *et al.*, 2024b; Sánchez *et al.*, 2023).

Considerando los datos de peso de la semilla y las semillas llenas por cono, se estima que es necesario recolectar y procesar en promedio 628 conos para obtener 1 kg de semillas; no obstante, por la variación entre rodales son necesarios 515 conos para Ixtenco, 609 para Altamira, 733 para San Bartolomé y 750 conos para San Pedro.

Análisis de correlación

Entre las variables de conos y semillas solo el peso unitario de la semilla mostró correlación moderada con la longitud ($r = 0.48$) y el diámetro del cono ($r = 0.58$) con una $P = 0.01$ para ambas variables, lo que indica que conos grandes producen semillas de mayor peso, dato útil para obtener plántulas de mayor vigor (Flores y Méndez, 2021; Sánchez *et al.*, 2023).

Por otro lado, existió poca influencia de las variables ambientales sobre las características morfológicas de conos y semillas (Cuadro 3); por ejemplo, la longitud del cono presentó una ligera asociación negativa con la temperatura y la precipitación ($r = -0.47$ y -0.48 respectivamente, $P = 0.01$); esto es, a mayor temperatura y precipitación menor longitud conos. De igual forma, el número de semillas desarrolladas presentó una ligera asociación negativa con la precipitación ($r = -0.47$, $P = 0.001$) (Cuadro 3); es decir, a mayor precipitación menos semillas desarrolladas.

La proporción de óvulos abortados se asoció positivamente con la precipitación ($r = 0.66$, $P = 0.002$) y temperatura ($r = 0.60$, $P = 0.001$) y negativamente con

la altitud ($r = -0.56$, $P = 0.001$). Estudios previos señalan que la alta precipitación y temperatura pueden afectar el desarrollo del cigoto y del embrión, ocasionando su muerte (Andrade-Gómez *et al.*, 2021). Asimismo, se observó que una menor precipitación ocasiona mayor número de semillas dañadas por insectos ($r = -0.43$, $P = 0.01$), lo cual se debe a que la disminución de la precipitación causa estrés hídrico en los árboles, lo que los hace más vulnerables al ataque de plagas (Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

La asociación entre los parámetros del suelo y los atributos de conos y semillas fue baja (Cuadro 3), esto significa que las propiedades del suelo evaluadas tienen poca influencia en los indicadores de conos y semillas analizados, contrario a lo encontrado para *Pinus martinzii* y *P. halepensis* Mill., ya que en estas especies la capacidad reproductiva es afectada por la calidad del sitio, principalmente por la disponibilidad de nutrientes (Ayari y Khouja, 2014; Rodríguez-Laguna *et al.*, 2012).

Consideraciones e implicaciones del estudio

Pinus montezumae en La Malinche, Tlaxcala presenta grandes cambios debido a la tala ilegal, presencia de plagas y enfermedades, el cambio climático, entre otros; de tal forma, que la densidad de arbolado es variable entre rodales y su efecto se refleja en los valores de los parámetros reproductivos encontrados, aunque hasta el momento se deduce que la persistencia de estas poblaciones en el tiempo está asegurada, siempre y cuando no existan alteraciones graves del ecosistema; por tanto, es factible incorporar este germoplasma a proyectos de producción de planta para reforestación comunitaria local y de la región. Las semillas de Ixtenco mostraron mayor eficiencia reproductiva y las de San Bartolomé fueron las más pesadas, por lo que se esperaría que las semillas de estos rodales sean idóneas para producir planta local adaptada, con mayor éxito en la germinación y establecimiento (Herrera-Hernández *et al.* 2024a), lo que es clave en programas de reforestación y restauración ecológica; no obstante, es fundamental evitar la disminución poblacional en los rodales por debajo de los valores aquí registrados para no demeritar la calidad genética del germoplasma y, de ser posible, aumentar la variación.

Es conveniente implementar programas de monitoreo temprano y control biológico contra *Cecidomya bisetosa*, especialmente en los rodales analizados, los cuales se pueden establecer como parcelas permanentes para evaluar el tamaño de la población del insecto, el grado de infestación, la producción de conos, de semillas llenas y vanas, así como su relación con variables climáticas en el contexto del aumento de temperaturas y retrasos en las lluvias, para un futuro manejo del germoplasma.

Cuadro 3. Análisis de correlación entre las variables ambientales y variables morfológicas de conos y semillas de *Pinus montezumae* del Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México.

Características	Altitud (msnm)	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	pH	Fósforo (mg kg ⁻¹)	NO ₃ (mg kg ⁻¹)
PESEC (g)	0.16	-0.18*	-0.16*	-0.16	-0.04	-0.21*
LONGC (mm)	0.38*	-0.47*	-0.48*	-0.26*	0.23*	-0.33*
DIAMC (mm)	-0.03	0.08	0.15*	-0.11*	-0.36*	-0.22*
POTPS	-0.03	-0.05	-0.15*	0.02	-0.13*	-0.12*
TSDES	0.31*	-0.34*	-0.47*	-0.13*	-0.00	-0.32*
SLLENA (%)	0.19*	-0.17*	-0.21*	-0.1*	-0.14*	-0.23*
SVANA (%)	0.26*	-0.19*	-0.22*	-0.12*	0.22*	-0.07
SDAÑA (%)	0.28*	-0.38**	-0.43*	-0.08*	0.10*	-0.28*
OABOR (%)	-0.56**	0.60*	0.66*	0.26*	-0.22*	0.40*
IENDO	-0.00	0.05	0.07	-0.02	0.19*	0.15*
EREP	0.12*	-0.15*	0.24*	-0.00	-0.07	-0.16*

*Significativo $P \leq 0.05$, **Significativo $P \leq 0.01$, PESEC: peso seco del cono, LONGC: longitud de cono, DIAMC: diámetro del cono, POTPS: Potencial de producción de semillas, TSDES: número total de semillas desarrolladas, SLLENA: semillas llenas, SVANA: semillas vanas, SDAÑA: semillas dañadas por insectos, OABOR: óvulos abortados, IENDO: índice de endogamia, EREP: eficiencia reproductiva.

Por último, es necesario considerar prácticas de manejo selectivo que promuevan árboles vigorosos o dominantes y mantener la heterogeneidad estructural del bosque, incluyendo la presencia de especies acompañantes, que no interfieren con la polinización y pueden aportar a las funciones de la biodiversidad del ecosistema.

CONCLUSIONES

Las características morfológicas y de producción de semillas de *P. montezumae* varían significativamente en los cuatro rodales del Parque Nacional La Malinche. La variación en la forma del cono y la producción de semillas muestra de poca a moderada asociación con la altitud, temperatura, precipitación, y poca con variables del suelo. El estudio de los parámetros reproductivos de los rodales de *P. montezumae* en el Parque Nacional La Malinche permite estimar la capacidad de regeneración natural a través de la semilla producida en los rodales y determinar estrategias de reforestación con germoplasma que garantice la adaptación de la planta a los sitios de plantación con variación climática, gracias a la amplia diversidad genética de la semilla.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades Tecnología e Innovación (SECIHTI) por otorgar beca para los estudios de maestría del primer autor.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade-Gómez K. A., C. Ramírez-Herrera, J. López-Upton, M. Jiménez-Casas y R. Lobato-Ortiz (2021) Indicadores reproductivos en dos poblaciones naturales de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:183-189, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.183>
- Aragón P. R. D., G. Rodríguez O., J. J. Vargas H., J. R. Enríquez V., A. Hernández H. y G. V. Campos Á. (2020) Selección fenotípica y características reproductivas de *Pinus pseudostrabus* var. *oaxacana* (Mirov) S.G. Harrison. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11:118-140, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i59.700>
- Ayari A. and M. L. Khouja (2014) Ecophysiological variables influencing Aleppo pine seed and cone production: a review. *Tree Physiology* 34:426-437, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu022>
- Cagnolo L. y G. Valladares (2011) Fragmentación del hábitat y desensamble de redes tróficas. *Ecosistemas* 20:68-78.
- Capilla-Dinorin E., J. López-Upton, M. Jiménez-Casas y V. Rebollo-Camacho (2021) Características reproductivas y calidad de semilla en poblaciones fragmentadas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44:211-219, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.211>
- Cruz S. B., S. George M. y A. Tlapa H. (2022) La agonía de los bosques de la Malinche. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería* 123:29-41.
- Delgado-Valerio P. (1994) Evaluación de la capacidad productiva y eficiencia de semillas para tres especies del género *Pinus* (*P. montezumae* Lamb. *P. pseudostrabus* Lind. y *P. leiophylla*

- Schl. & Cham.), en la zona boscosa de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 54:267-274, <https://doi.org/10.17129/botsci.1434>
- El-Kassaby Y. A. and C. Cook (1994) Female reproductive energy and reproductive success in a Douglas-fir seed orchard and its impact on genetic diversity. *Silvae Genetica* 43:243-246.
- Flores A. y J. Méndez G. (2021) Evaluación cuantitativa de la germinación de *Quercus variabilis* Blume en tres tamaños de semilla. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12:202-211, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i68.1104>
- Flores A. y G. Moctezuma-López (2021) Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de germoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12:122-140, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i66.829>
- Flores-López C., J. López-Upton y J. J. Vargas-Hernández (2005) Indicadores reproductivos en poblaciones naturales de *Picea mexicana* Martínez. *Agrociencia* 39:117-126.
- Herrera-Hernández R., J. López-Upton, L. Muñoz-Gutiérrez and C. Ramírez-Herrera (2024a) Seed production potential of *Pinus montezumae* Lambert in central Mexico. *Ciência Florestal* 24:e71911, <https://doi.org/10.5902/1980509871911>
- Herrera-Hernández R., J. López-Upton, L. Muñoz-Gutiérrez y C. Ramírez-Herrera (2024b) Germinación y características de plántulas de *Pinus montezumae* Lamb. en poblaciones del centro de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 47:199-207, <https://doi.org/10.35196/rfm.2024.2.199>
- Kremer A., O. Ronce, J. J. Robledo-Arnuncio, F. Guillaume, G. Bohrer, R. Nathan, ... and S. Schueler (2012) Long-distance gene flow and adaptation of forest trees to rapid climate change. *Ecology Letters* 15:378-392, <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2012.01746.x>
- Ledig F. T., P. D. Hodgskiss and V. Jacob-Cervantes (2002) Genetic diversity, mating system, and conservation of a Mexican subalpine relict, *Picea mexicana* Martínez. *Conservation Genetics* 3:113-122, <https://doi.org/10.1023/A:1015297621884>
- Liu J., D. Zhang, G. Zhou and H. Duan (2012) Changes in leaf nutrient traits and photosynthesis of four tree species: effects of elevated [CO₂], N fertilization and canopy positions. *Journal of Plant Ecology* 5:376-390, <https://doi.org/10.1093/jpe/rts006>
- López V. J. M. (2023) Marea roja en la Malinche: el ataque del descortezador. *Revista Digital Universitaria* 24:1-7, <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2023.24.2.19>
- Mápula-Larreta M., J. López-Upton, J. J. Vargas-Hernández and A. Hernández-Livera (2007) Reproductive indicators in natural populations of Douglas-fir in Mexico. *Biodiversity and Conservation* 16:727-742, <https://doi.org/10.1007/s10531-005-5821-y>
- Martínez R. J. A., F. Cruz C., J. G. Gurrola A. y J. A. Nájera L. (2020) Potencial productivo de conos y semillas de dos especies del género *Pinus*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11:26-46, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.592>
- Mendoza-Maya E, J. Espino-Espino, C. Z. Quiñones-Pérez, C. Flores-López, C. Wehenkel, J. J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero (2015) Propuesta de conservación de tres especies mexicanas de piceas en peligro de extinción. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38:235-247 <https://doi.org/10.35196/rfm.2015.3.235>
- Morales-Hernández J., M. Gómez-Romero, N. M. Sánchez-Vargas, C. Velázquez-Becerra, J. Cruz-de-León y E. Ambríz (2022) Producción de semillas e indicadores reproductivos en *Pinus martinzii* de dos procedencias del estado de Michoacán, México. *Bosque* 43:221-229, <http://doi.org/10.4067/S0717-92002022000300221>
- Morales-Velázquez M. G., C. A. Ramírez-Mandujano, P. Delgado-Valerio y J. López-Upton (2010) Indicadores reproductivos de *Pinus leiophylla* Schltdl. et Cham. en la cuenca del río Angulo, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1:31-41, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i2.635>
- Mosseler A., J. E. Major, J. D. Simpson, B. Daigle, K. Lange, Y. S. Park, ... and O. P. Rajora (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>
- Nonogaki H. (2017) Seed biology updates highlights and new discoveries in seed dormancy and germination research. *Frontiers in Plant Sciences* 8:524, <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00524>
- Perry J. P. (1991) The Pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon, USA. 231 p.
- Piñeira V. J., M. Tapia y F. Gebauer (2015) ¿Qué es la consanguinidad? Informativo INIA Núm. 45. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Centro INIA Tameil Aike. Coyhaike, Chile. 4 p.
- 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* 51:91-104.
- Rodríguez F. C. (1997) La silvicultura de *Pinus montezumae* Lamb. en la región central de México. *Revista Ciencia Forestal en México* 22:91-115.
- Rodríguez-Laguna R., R. Razo-Zárate, J. Juárez-Muñoz, J. Capulín-Grande y R. Soto-Gutiérrez (2012) Tamaño de cono y semilla en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. var. *greggii* establecidas en diferentes suelos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35:289-298, <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.4.289>
- Sáenz-Romero C., R. A. Lindig-Cisneros, D. G. Joyce, J. Beaulieu, J. B. St. Clair, J. Bradley and B. C. Jaquish (2016) Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 22:303-323, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2014.10.052>
- Sánchez M. J. L., M. Jiménez C., C. Ramírez H. y H. Viveros V. (2023) Calidad de semilla y crecimiento de planta en poblaciones y altitudes de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 14:143-165, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1297>
- Santos S. O. O., M. A. González T. y R. López A. (2018) Producción de semilla y potencial biológico de tres especies de *Pinus* en Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9:538-549, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.264>
- SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2002) NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, sanidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México, D. F. Edición 31 de diciembre de 2002.
- Taliman N. A., Q. Dong, K. Echigo, V. Raboy and H. Saneoka (2019) Effect of phosphorus fertilization on the growth, photosynthesis, nitrogen fixation, mineral accumulation, seed yield, and seed quality of a soybean low-phytate line. *Plants* 8:119, <https://doi.org/10.3390/plants8050119>
- Zamora-Campos E. M., O. G. Vázquez-Cuecuecha, A. Pérez-Ahuatzi, R. Cano-Flores, A. Aparicio-Rentería y E. Fernández P. (2007) Variación natural de la densidad de la madera en *Pinus montezumae* Lamb. en tres altitudes del parque nacional la Malinche, Tlaxcala, México. *Foresta Veracruzana* 9:33-37.