



GERMINACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE PLÁNTULAS DE *Pinus montezumae* LAMB. EN POBLACIONES DEL CENTRO DE MÉXICO

GERMINATION AND CHARACTERISTICS OF *Pinus montezumae* LAMB. SEEDLINGS IN POPULATIONS OF CENTRAL MEXICO

Raquel Herrera-Hernández¹, Javier López-Upton^{1*}, Liliana Muñoz-Gutiérrez²
y Carlos Ramírez-Herrera¹

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Posgrado en Ciencias Forestales, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Coyoacán, Ciudad de México, México.

*Autor de correspondencia (jlopezupton@gmail.com)

RESUMEN

Las poblaciones de *Pinus montezumae* del centro de México son esenciales por su contribución en servicios ambientales a más de 25 millones de personas de esta zona. Estos bosques han sido amenazados por el cambio de uso de suelo y la fragmentación, lo que reduce su regeneración. El objetivo del presente estudio fue determinar la germinación de semillas y algunas características morfológicas de plántulas de *P. montezumae* de ocho poblaciones del centro de México, así como analizar la influencia de la densidad de rodales y variables climáticas y edáficas sobre la calidad de semillas. Se utilizaron semillas de 10 árboles por población. Se evaluaron varios parámetros germinativos y características morfológicas de plántulas a los 40 días después de emergencia. Se utilizó un modelo lineal mixto generalizado para evaluar la significancia del factor población en cada característica y se realizaron análisis de correlación de Pearson con variables edáficas, ambientales y de densidad. Hubo diferencias estadísticas ($P \leq 0.05$) en las variables evaluadas. La germinación media fue 84 %, con variación de 80.7 a 87 % entre poblaciones. Las plántulas presentaron, en promedio, 6.5 cotiledones (3-10, pero 6-7 más común) con una longitud de 29 mm y un hipocótilo de 16.4 mm. La germinación estuvo relacionada con la precipitación ($r = 0.75$), y el número y la longitud de cotiledones con la temperatura de los sitios de origen de las poblaciones ($r = 0.84$, $r = 0.87$, respectivamente). La materia orgánica mostró correlación negativa con la longitud de cotiledones ($r = -0.94$). El contenido de fósforo del suelo de origen correlacionó positivamente con la germinación ($r = 0.94$) y con el número de cotiledones ($r = 0.77$), mientras que el nitrato lo hizo con la longitud del hipocótilo ($r = 0.80$). La densidad de árboles no presentó correlación con las variables evaluadas, por lo que el bajo número de árboles no es limitante para la repoblación.

Palabras clave: *Pinus montezumae*, adaptación local, efecto materno, germinación.

SUMMARY

Populations of *Pinus montezumae* in central Mexico are essential for their contribution in environmental services to more than 25 million people in this area. These forests have been threatened by changes in land use and fragmentation, reducing their regeneration. The objective of this study was to determine seed germination and some morphological characteristics of *P. montezumae* seedlings of eight populations of central Mexico, as well as analyzing the influence of stand density and climatic and soil variables on seed quality. Seeds from 10 trees per population were used. Several germination parameters and morphological characteristics of seedlings were

evaluated at 40 days after emergence. A generalized mixed linear model was used to evaluate the significance of the population factor for each trait and Pearson correlation analyses were performed with soil, environmental and density variables. There were statistical differences ($P \leq 0.05$) in the variables evaluated. The average germination was 84 %, with variation from 80.7 to 87 % between populations. Seedlings showed, on average, 6.5 cotyledons (3-10, but 6-7 more common) with a length of 29 mm and a hypocotyl of 16.4 mm. Germination was related to precipitation ($r = 0.75$) and the number and length of cotyledons to the temperature of the populations site of origin ($r = 0.84$, $r = 0.87$, respectively). Organic matter showed negative correlation with cotyledon length ($r = -0.94$). Phosphorus content in the soil of origin positively correlated with germination ($r = 0.94$) and the number of cotyledons ($r = 0.77$), while nitrate correlated with hypocotyl length ($r = 0.80$). The density of trees did not correlate with the variables evaluated, so the low number of trees is not limiting for repopulation.

Index words: *Pinus montezumae*, germination, local adaptation, maternal effect.

INTRODUCCIÓN

Pinus montezumae Lambert es apreciada por su calidad de madera e importancia ecológica (Flores y Moctezuma-López, 2021). Las poblaciones de este pino del centro de México son esenciales para los asentamientos urbanos como la Ciudad de México, Puebla y Tlaxcala, ya que contribuyen con la captura de carbono, la infiltración de agua y la retención de partículas contaminantes en una región donde habitan cerca de 25 millones de personas (Espejel, 2019). La preservación de estos bosques por medio de la regeneración natural o asistida resulta esencial. Por esa razón, la especie ocupa el segundo lugar en la producción de planta en viveros para actividades de reforestación de los bosques templados de México (Manzanilla *et al.*, 2019). La evaluación de la capacidad germinativa de las semillas es importante debido a que influye en la calidad de las plántulas y el éxito que estas tendrán en el sitio de plantación (Castoldi y Molina, 2014). Para que las semillas generen plantas con la calidad fisiológica y física deseables debe haber condiciones ambientales favorables

en las poblaciones naturales (Bishaw *et al.*, 2009), por lo que es necesario relacionar las condiciones del medio con el proceso de desarrollo y germinación de las semillas para entender el proceso de regeneración de las poblaciones naturales.

A pesar de la importancia que tiene *P. montezumae*, solo existe un estudio que evalúa la relación entre la germinación y el desarrollo inicial de plántulas con las variables ambientales y ecológicas donde crece (Delgado-Valerio, 1994), sin que existan experiencias en las poblaciones aledañas al área metropolitana del Valle de México y de Puebla-Tlaxcala, la más grande de México. Así, el objetivo del presente estudio fue determinar la calidad de semilla, en relación con la germinación y las características morfológicas iniciales de plántulas de ocho poblaciones de *P. montezumae* del centro de México. Se partió de la hipótesis de que las variables climáticas, edáficas y de densidad de la población de origen influyen en la calidad de semillas; es decir, en la germinación y en el desarrollo inicial de las plántulas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Recolecta de conos

Los conos se recolectaron de ocho poblaciones de los estados de México, Puebla, Tlaxcala y Ciudad de México (CDMX) (Cuadro 1, Figura 1). Se seleccionaron 10 árboles adultos sanos de entre 50 y 80 años de edad por población, con una distancia mínima de 50 m entre ellos. Se recolectaron 10 conos maduros cerrados de cada árbol durante el mes de diciembre de 2021. Los conos fueron sanos, sin deformaciones y sin agujeros en el exterior causadas por insectos; después, fueron almacenados temporalmente en bolsas de papel y secados a la sombra a una temperatura diurna media de 28 °C durante 10 días, luego se mantuvieron durante otras dos semanas en condiciones de invernadero (8-40 °C) donde abrieron por completo (Herrera-Hernández *et al.*, 2024). En la misma fecha y sitios de recolección de conos se establecieron sitios de muestreo de 17.84 m de radio (0.1 ha), donde se contaron los individuos de la especie mayores de 25 cm de diámetro, para después estimar la densidad de árboles por hectárea para relacionarla con la germinación y características de plántulas.

Prueba de germinación

La prueba de germinación se estableció el 3 de febrero del 2022 en un invernadero de plástico calibre 720 con malla sombra de 50 % a 1 m sobre la siembra. La temperatura fluctuó de 6-8 a 24-29 °C diariamente, aumentando ligeramente al final de la prueba, con 11.3 a 12 h de luz. Se usaron rejillas de 54 tubetes de 310 cm³ (6 × 9 contenedores). Se evaluó la semilla de 80 árboles (10

por población); las poblaciones y los árboles se colocaron de forma aleatoria en cada repetición, los árboles anidados en sus poblaciones. Se establecieron seis repeticiones, cada una compuesta por 720 tubetes (80 árboles × 9 contenedores). Las semillas de cada árbol se sembraron en hileras de nueve tubetes, cuatro semillas por cada tubete, o sea 36 semillas por árbol en cada repetición. Por lo tanto, se utilizaron 17,280 semillas en total (6 repeticiones × 80 árboles × 9 tubetes × 4 semillas); 216 por cada árbol para la evaluación de la germinación.

Las semillas se desinfectaron con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) 3 % por 20 min y se sometieron a imbibición en agua destilada por 20 h. El sustrato utilizado estuvo compuesto por una mezcla de corteza composteada, turba de musgo, perlita y vermiculita en proporción volumétrica 40-40-10-10, respectivamente. La semilla se depositó a 4 mm de profundidad cubiertas por una capa de gravilla de tezontle esterilizado. Se regó diariamente en la primera semana y después cada dos días. El conteo de germinación se realizó diariamente hasta el día 30 después de la siembra. Se consideró como semilla germinada al momento de la emergencia aquella con las hojas cotiledonares visibles. Las variables evaluadas para la calidad de la semilla en la germinación fueron:

1. Capacidad germinativa: proporción de semillas germinadas (SG) respecto al total de semillas sembradas (SS) durante el tiempo de la prueba.
2. Valor pico: valor máximo obtenido de la división del porcentaje de germinación acumulada y el número de días en que alcanzó dicho porcentaje.
3. Velocidad de germinación: relación del total de semillas germinadas con el tiempo a la última semilla germinada para cada árbol, que es igual o menor al tiempo que dura la prueba.

$$VG = \sum \frac{n_i}{t}$$

Donde n_i es el número de semillas germinadas al día i y t es el tiempo de germinación desde la siembra hasta la germinación de la última semilla.

4. 50% de germinación: tiempo en días en alcanzar el 50 % de la germinación. Se calculó por medio del software GERMINATOR 1.29 (Joosen *et al.*, 2010) donde se obtuvo un valor medio por población.

Cuarenta días después de la siembra se extrajeron 30 plántulas de cada árbol para determinar el número y la longitud de hojas cotiledonares y la longitud del hipocótilo; las mediciones se realizaron con un vernier TRUPER-14388. Se contabilizó el número de plántulas albinas por árbol.

Cuadro 1. Localización, altitud, precipitación, temperatura y densidad de árboles en 0.1 ha alrededor de *Pinus montezumae* en ocho poblaciones del centro de México.

Población	Latitud Norte	Longitud Oeste	Altitud (msnm)	Precipitación [†] (mm)	Temperatura ^{††} (°C)	Densidad (árboles/0.1 ha)
Tlacotenco, CDMX	19° 10.80'	98° 58.90'	2959	901	13 (3.4)	9.0
Llano Grande, México	19° 20.83'	98° 43.53'	3176	883	11 (1.1)	10.7
Tlahuapan, México	19° 20.90'	98° 37.35'	2844	912	13 (1.9)	6.2
San Rafael, Puebla	19° 16.80'	98° 35.85'	2913	928	13 (3.7)	15.8
San Bartolo, Tlaxcala	19° 16.30'	98° 05.53'	2850	896	14 (10.0)	19.3
San Pedro, Tlaxcala	19° 15.56'	98° 05.08'	2949	910	14 (8.9)	10.2
Altamira, Tlaxcala	19° 16.96'	97° 59.45'	3000	912	13 (8.0)	22.8
Ixtenco, Tlaxcala	19° 17.41'	97° 58.21'	2950	904	14 (9.4)	18.1

[†]Precipitación media anual. ^{††}Temperatura media anual y mínima promedio de invierno entre paréntesis. Los valores son promedio de los años 2018, 2019 y 2020 obtenidos en el software ClimateNA 6.4 (Wang *et al.*, 2016). Poblaciones ordenadas de oeste a este.

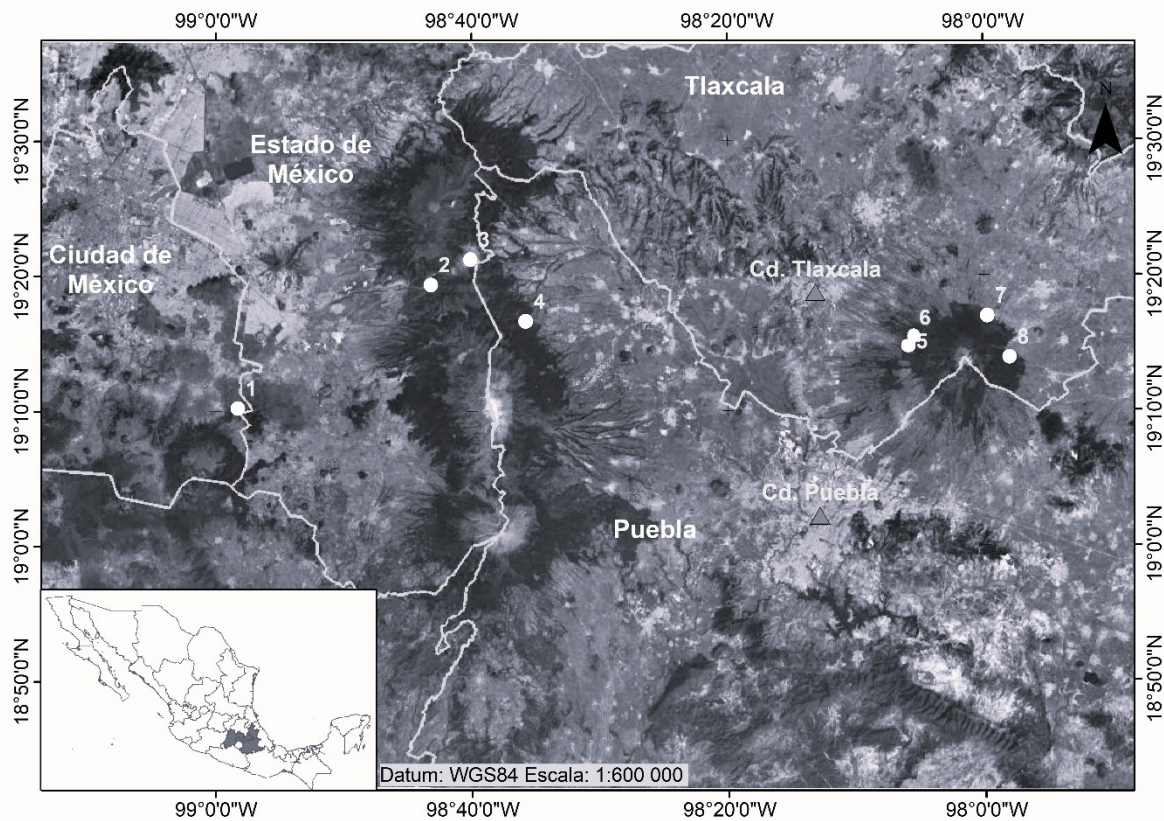


Figura 1. Distribución de las ocho poblaciones de *Pinus montezumae* en el centro de México. Los nombres de las poblaciones se muestran en el Cuadro 1.

Análisis de suelo del sitio de recolecta

Se recolectaron submuestras de suelo 1 m de distancia del fuste de cada árbol, a 10-20 cm de la superficie después de remover la hojarasca. En la mayoría de los suelos forestales esa profundidad corresponde al horizonte A, donde la actividad microbiológica y la producción de raíces finas son importantes en la absorción de agua y nutrientes, comparada con profundidades mayores (Binkley y Fisher, 2020; López-Escobar *et al.*, 2018). Por otro lado, en suelos de origen volcánico, como los de este estudio, la vegetación forestal depende en gran medida del fósforo orgánico que se encuentra en mayores cantidades en el suelo superficial (Schlesinger y Bernhard, 2020). Las submuestras se mezclaron para formar una muestra compuesta por población, las que se analizaron en el Laboratorio LANISAF de la Universidad Autónoma Chapingo siguiendo la NOM 021-SEMARNAT-2000, donde se determinó: pH con la relación 1:2, concentración de amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) cuantificado con un analizador por inyección de flujo, fósforo estimado en un espectrofotómetro ultravioleta-visible y materia orgánica evaluada con el método Walker y Black (Leeper *et al.*, 2020). Se consideraron estas cinco variables edáficas debido a que se ha detectado una relación con la productividad de la vegetación arbórea en el bosque (Dimkpa *et al.*, 2017).

Análisis estadístico

En todas las variables de germinación y crecimiento inicial de las plántulas existió una distribución normal de los residuos estandarizados sobre el gráfico Q-Q, con valores de Shapiro-Wilk desde 0.9489 (capacidad germinativa) a 0.7977 (valor pico) $P = W < 0.0001$. Estas variables se analizaron con el paquete de análisis estadístico SAS 9.4 (Khatun, 2021). Con un modelo lineal mixto generalizado se evaluó la significancia del factor población en cada variable ($P \leq 0.05$) mediante el procedimiento GLIMMIX. La comparación de las medias se realizó con la opción LSMEANS del procedimiento anterior. Para conservar el nivel de significancia se aplicó un ajuste de Tukey-Kramer.

Las variables climáticas se calcularon con la elevación, latitud y longitud media de cada población utilizando el programa ClimateNA 6.4 (Wang *et al.*, 2016). Los valores medios se obtuvieron a partir de los datos de 2018, 2019 y 2020, correspondientes a los años donde el clima pudo influir en el desarrollo de las semillas (Parker *et al.*, 2013). Se emplearon cuatro variables anuales y 16 estacionales. Se obtuvo un dato por población para cada variable poblacional. Los valores promedio por población de las variables de germinación y características de plántulas se correlacionaron con las variables edáficas, climáticas y de densidad para determinar alguna asociación entre

estas variables. Se empleó el método de Spearman con $P \leq 0.05$ para determinar significancia. El análisis se realizó en R.4.0.3 (Goszka y Snell, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Germinación y características morfológicas de las plántulas

Existieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre poblaciones en las variables evaluadas (Cuadro 2). La germinación media global fue similar a la reportada por Camacho (1994), de 72 a 90 % en semilla recién cosechada, pero menor al 99.5 % reportada en árboles ubicados en rodales del estado de Michoacán con semilla recién recolectada (Delgado-Valerio, 1994). Es común observar diferencias entre procedencias debido a la variabilidad genética entre ellas y a la variabilidad ambiental en la producción de las semillas (Ganatsas *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2015). El valor pico y la velocidad de germinación expresan la rapidez con que ocurrió el proceso de germinación y el nivel de vigor que tenían las semillas.

La semilla de *P. montezumae* emergió rápidamente, 3.6 días para germinar el 50 % de lo germinado (Figura 2). A pesar de la variación de temperatura de 6 a 29 °C que ocurrió en el mes de febrero en el invernadero, la germinación de la semilla evaluada fue rápida comparada con otros pinos. Especies del complejo *Pseudostrobus-Montezumae*, como *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl. necesitaron 5.5 días para alcanzar la mitad de la germinación total (Romero-Rangel *et al.*, 2017), o un mayor valor del pico germinativo que *P. hartwegii* Lind. (Sánchez *et al.*, 2023); en esta última especie se reportan de 12 a 16 días para lograr el 50 % de germinación entre ocho intervalos de altitud, sin tendencia entre elevaciones. En otras especies de distintos grupos taxonómicos del mismo género de semillas de menor tamaño, como *P. leiophylla* Schiede ex Schldt. & Cham. la semilla germinó más lentamente (Gómez *et al.*, 2010) o *P. patula* Schiede ex Schldt. & Cham. que requirió de 15 a 30 días para iniciar la emergencia en condiciones de invernadero (Fuentes-Amaro *et al.*, 2021). En especies del subgénero *Strobus*, como los pinos piñoneros *P. cembroides* Zucc. y *P. orizabensis* (D.K. Bailey) D.K. Bailey & F.G. Hawksworth, el 50 % de germinación se alcanzó en 12.7 y 13.4 días, respectivamente (Hernández-Anguiano *et al.*, 2018), mientras que semillas de *P. chiapensis* (Martínez) Andresen en promedio tardaron 14 días para alcanzar 50 % de la germinación total, seis días de diferencia entre las siete poblaciones evaluadas (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021); sin embargo, no se detectó que las poblaciones de *P. montezumae* con mayor porcentaje de germinación alcanzaron el 50 % del total germinado en menos días.

Cuadro 2. Medias poblacionales (\pm error estándar) en las variables de germinación de semillas de *Pinus montezumae* de ocho poblaciones del centro de México.

Población	Porcentaje de germinación	Valor pico	Velocidad de germinación	Días para el 50 % de germinación [†]
Tlacotenco	81.1 \pm 2.0 b	15.8 \pm 1.1 b	2.4 \pm 0.1 c	2.9
Llano Grande	80.7 \pm 2.4 b	14.0 \pm 1.5 bc	2.5 \pm 0.2 c	3.8
Tlahuapan	84.4 \pm 2.7 ab	13.6 \pm 0.7 bc	2.6 \pm 0.2 bc	3.7
San Rafael	88.2 \pm 1.5 a	19.3 \pm 1.4 a	3.5 \pm 0.2 a	2.7
San Bartolo	87.0 \pm 2.4 a	13.5 \pm 0.8 bc	3.0 \pm 0.2 b	3.9
San Pedro	84.6 \pm 2.5 ab	14.1 \pm 0.7 bc	2.4 \pm 0.1 c	3.6
Altamira	86.1 \pm 2.6 ab	12.9 \pm 1.0 c	2.8 \pm 0.2 b	4.2
Ixtenco	84.4 \pm 1.7 ab	11.6 \pm 1.0 c	1.7 \pm 0.1 d	4.3
Promedio	84.0	14.4	2.61	3.6

[†]Valores calculados como promedios por población. Valores medios con letras diferentes por columna indican diferencias estadísticamente significativas (P < 0.05).

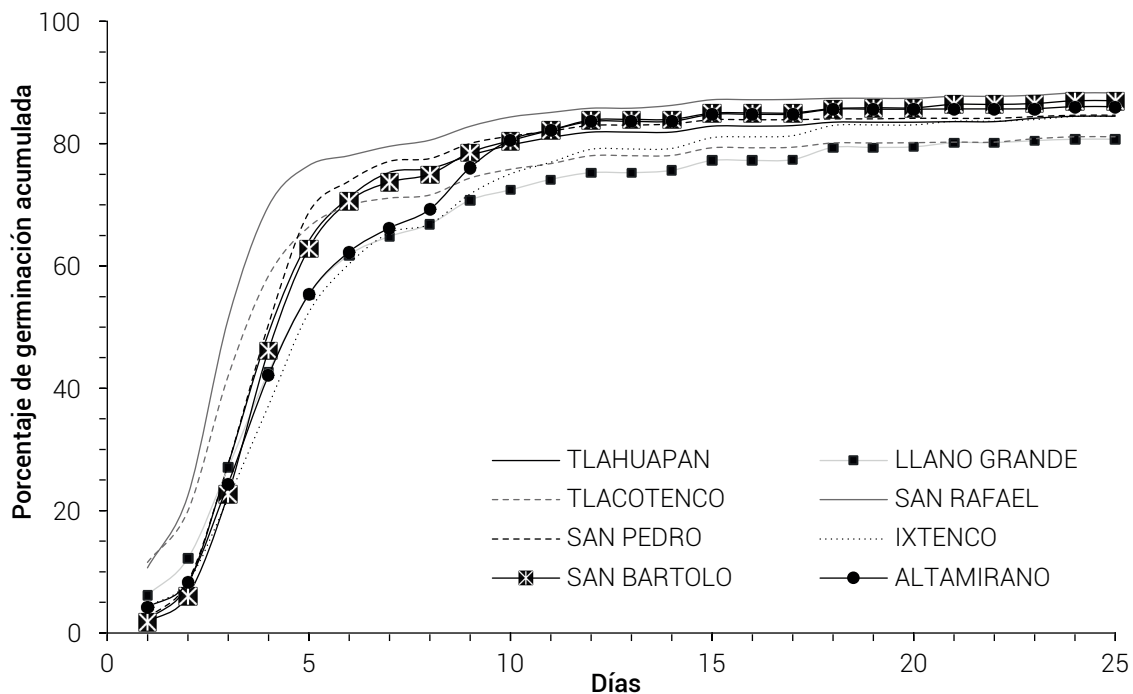


Figura 2. Curva de germinación acumulada de *Pinus montezumae* Lamb. en ocho poblaciones del centro de México.

De las 14,515 semillas germinadas, solo en tres poblaciones se detectaron plantas albinas, nueve en Tlacotenco, 10 en San Bartolo y una en Altamira; es decir, 0.14 % del total. En especies forestales se ha identificado que este fenómeno es resultado de la autofecundación relacionada con una baja densidad de árboles (Takeuchi *et al.*, 2020). De cualquier forma, la frecuencia relativa de plantas albinas fue inferior al 0.5 % de las plantas germinadas por población, y en la mayoría de los casos no se detectaron.

En las características morfológicas de plántulas existieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre poblaciones (Cuadro 3). El 72 % de las plántulas muestreadas presentó seis o siete cotiledones (Cuadro 4). El número de cotiledones producidos en plántulas de *P. patula* fue 5.2 y el largo del hipocótilo 21 cm (Fuentes-Amaro *et al.*, 2020). Plántulas evaluadas en otro estudio en *P. cembroides*, *P. elliotii* Engelm., *P. virginiana* Mill. y *P. echinata* Mill. presentaron 11, 6.6, 5.6 y 7.5 cotiledones, respectivamente (Mann, 1979). La diferenciación puede deberse a una adaptación al medio, ya que las especies de ambientes con estrés hídrico y nutricional podrían presentar más hojas cotiledonares de mayor tamaño debido a que funcionan como reservas durante el crecimiento (Zhang *et al.*, 2008).

Análisis de correlación de los indicadores de germinación

No se observó correlación entre el peso de semilla y longitud del hipocótilo ($r = 0.20$, $P = 0.07$; Cuadro 5). En plántulas de *P. strobus* L. el peso de la semilla influyó sobre la longitud del hipocótilo, siendo mayor cuando

la semilla fue más pesada (Parker *et al.*, 2006). El mayor crecimiento en las primeras semanas se debe a que estas semillas poseen un embrión más grande y mayor cantidad de reservas (Parker *et al.*, 2006). En *P. sylvestris* L. se determinó una relación entre el peso de semilla y el número de cotiledones (Castoldi y Molina, 2014), mientras que en estas poblaciones de *P. montezumae* no existió relación entre ambas variables ($r = 0.10$, $P = 0.3$). Aunque la diferencia en el peso de semilla fue mayor entre árboles, sí las hubo entre poblaciones (datos no mostrados), factor que puede reflejarse en el desarrollo inicial de las plántulas entre poblaciones (Carles *et al.*, 2009). No se encontró relación significativa de la altitud con las variables de germinación evaluadas. En el caso de *P. patula*, las poblaciones de mayor altitud (600 m de diferencia) produjeron semillas con mayor porcentaje y velocidad de germinación en comparación con las poblaciones de menor elevación (Fuentes-Amaro *et al.*, 2021).

De las variables climáticas, la temperatura media anual se asoció con la longitud de cotiledones ($r = 0.87$) y el número de cotiledones ($r = 0.84$). Esta relación entre las características de las semillas y plántulas podrían deberse a un proceso adaptativo local (genético), en el que los árboles generan semilla más grande con el fin de generar plántulas vigorosas con capacidad de resistir el estrés ambiental que genera la temperatura; o bien, podría ser un proceso de variación morfológica (fenotipo) a causa de la fluctuación anual del ambiente. Para determinar la causa es necesario evaluar distintos ciclos reproductivos y relacionarlos con las variables climáticas. La precipitación es una variable ambiental que muestra alta influencia sobre el desarrollo de plántulas en coníferas, por lo que ha sido empleada en la construcción de modelos de predicción

Cuadro 3. Valores medios y error estándar (\pm) a 40 días después de la siembra de las hojas cotiledonares y del hipocótilo de plántulas de *Pinus montezumae* de ocho poblaciones del centro de México.

Población	Hojas cotiledonares (No.)	Longitud de hojas cotiledonares (mm)	Longitud de hipocótilo (mm)
Tlacotenco	6.31 \pm 0.05 c	27.5 \pm 0.2 c	13.1 \pm 0.1 f
Llano Grande	5.79 \pm 0.05 d	25.6 \pm 0.2 d	11.9 \pm 0.1 g
Tlahuapan	6.35 \pm 0.05 c	29.7 \pm 0.2 ab	14.3 \pm 0.2 e
San Rafael	6.69 \pm 0.04 b	29.4 \pm 0.2 b	15.6 \pm 0.1 d
San Bartolo	7.15 \pm 0.05 a	30.4 \pm 0.2 a	23.2 \pm 0.3 a
San Pedro	6.69 \pm 0.05 b	29.7 \pm 0.2 ab	17.9 \pm 0.2 c
Altamira	6.76 \pm 0.05 b	29.3 \pm 0.3 b	19.3 \pm 0.3 b
Ixtenco	6.67 \pm 0.04 b	30.2 \pm 0.2 a	14.5 \pm 0.1 e
Promedio	6.5	29.0	16.4

Valores medios con letras diferentes por columnas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$).

Cuadro 4. Frecuencia absoluta y relativa del número de hojas cotiledonares en plántulas de *Pinus montezumae* en ocho poblaciones del centro de México.

Número de hojas cotiledonares	Frecuencia	
	Absoluta [†]	Relativa
3	1	0.05
4	37	1.5
5	216	9.1
6	979	40.8
7	757	31.5
8	365	15.2
9	44	1.8
10	1	0.05
Total	2400	100

[†]Muestra de 30 plantas por árbol seleccionadas al azar.

para producción de semilla y su capacidad germinativa (Almqvist *et al.*, 1998). En *P. montezumae* se observó correlación positiva de germinación con precipitación media anual de la localidad ($r = 0.75$, Cuadro 5).

En *P. chiapensis* la capacidad germinativa no se asoció significativamente con las variables ambientales o de densidad de árboles, aunque la velocidad de germinación lo hizo positivamente con la altitud y, por tanto, de manera negativa con la temperatura; esto es, la semilla de sitios más fríos germinó más rápido (Capilla-Dinorin *et al.*, 2021),

lo que no ocurrió con las poblaciones de *P. montezumae* en estudio.

De las variables edáficas, existe relación positiva del fósforo con la germinación ($r = 0.94$) y el número de cotiledones ($r = 0.77$; Cuadro 5). Este elemento normalmente se ha relacionado con el aumento en el número de estructuras reproductivas en huertos semilleros (McCavour *et al.*, 2014). En el presente estudio las poblaciones de sitios con mayor precipitación se ubican en suelos más ricos en este mineral. El incremento de fósforo en el suelo promueve la producción de semilla con mejor calidad, incrementando significativamente la concentración de lípidos y proteínas en el material de reserva, necesarios en el desarrollo inicial de plántulas (Taliman *et al.*, 2019; White y Veneklaas, 2012). También, se observó correlación positiva entre el nitrato y la longitud del hipocótilo ($r = 0.80$). La correlación observada puede deberse al aumento del área foliar de los árboles al incrementarse el contenido de nitrato en el suelo, lo que a su vez representa un incremento en la eficiencia fotosintética (Liu *et al.*, 2012). Los fotosintatos producidos suelen distribuirse en mayor proporción en la parte aérea de los árboles (Albaugh *et al.*, 2004), lo que genera mayor disponibilidad de azúcares que pudieran ser utilizados en la formación de semillas con mejor calidad.

Además, la longitud de los cotiledones mostró una correlación negativa con el contenido de materia orgánica en el suelo ($r = -0.94$; Cuadro 5); esto muestra que los cotiledones son más largos en las poblaciones con menor contenido de materia orgánica. Se esperaba que la relación fuera positiva debido a que la materia orgánica mejora las

Cuadro 5. Valores de correlación de variables edáficas y ambientales e indicadores de germinación de *Pinus montezumae* en ocho poblaciones del centro de México.

Variable [†]	Capacidad germinativa	Velocidad de germinación	Número de cotiledones	Longitud de cotiledones	Longitud de hipocótilo
P	0.94**	0.39	0.77*	0.41	0.59
NH ₄ ⁺	0.16	0.45	0.20	-0.35	0.27
NO ₃ ⁻	0.24	0.00	0.65	0.44	0.80*
MO	-0.50	0.18	-0.59	-0.94**	-0.56
pH	-0.38	0.32	-0.62	-0.57	-0.56
PrecMA	0.75*	0.36	0.42	0.09	0.13
HumRel	0.23	-0.22	0.55	0.32	0.54
TempMA	0.55	-0.17	0.84*	0.87*	0.59
PesoSEM	0.10	0.03	0.10	0.25	0.20

[†]P: fósforo disponible, NH₄⁺: amonio, NO₃⁻: nitrato, MO: materia orgánica, pH: potencial de hidrógeno, PrecMA: precipitación media anual, HumRel: humedad relativa, TempMA: temperatura media anual, PesoSEM: peso de semilla. *: $P \leq 0.05$, **: $P \leq 0.01$. Tamaño de muestra = 8.

propiedades físicas y químicas del suelo (Grigal y Vance, 2000); sin embargo, la relación podría explicarse más como adaptación a suelos pobres donde semillas grandes darían mayor ventaja para que las plántulas se puedan establecer, tal como ocurre con la adaptación al déficit hídrico (Calama *et al.*, 2017). Este efecto contrario podría deberse además a la interacción con otros elementos y la densidad de árboles, este último mantiene un efecto directo en las propiedades del suelo (Lei *et al.*, 2019), aunque el número de árboles de *P. montezumae* rodeando a los árboles muestreado (densidad) no mostró correlaciones significativas con las variables evaluadas.

Implicación

Una de las especies más abundantes de los bosques del centro de México es *P. montezumae*. Estos macizos forestales son esenciales para más de 25 millones de personas que habitan en esta zona por su aportación de servicios ambientales y aprovechamiento maderable. Además del cambio climático y de uso de suelo, la fragmentación y la baja densidad de árboles en estos bosques podrían reducir su capacidad de regeneración natural. Un trabajo previo reciente en estas poblaciones mostró que es aceptable la producción de semilla llena por cono (Herrera-Hernández *et al.*, 2024), por lo que, dados los valores de germinación obtenidos, se estima que la capacidad de regeneración está en niveles aceptables.

La diferenciación morfológica de plántulas determinadas entre las poblaciones muestreadas parece ser el resultado de adaptación local a las condiciones climáticas y edáficas al encontrarse relaciones entre el desarrollo de las plantas y las variables ambientales estudiadas; por ejemplo, las poblaciones difieren en la velocidad con que sus semillas emergieron, lo que puede darle ventajas competitivas, como se ha señalado en especies que germinan más rápido (Verdú y Traveset, 2005). La relación con los contenidos de fósforo en el suelo puede ser considerada en el manejo de las unidades productoras de germoplasma forestal, caso particular de los huertos semilleros donde se aplica fertilización alta en niveles de este nutrimento, por lo que deberían establecer estudios de fertilización y sus efectos en la producción de semillas, controlando otros factores. La densidad de árboles no presentó correlación significativa con ninguna variable, por lo que la fragmentación no es todavía limitante para la repoblación; sin embargo, al realizar la recolecta de conos para obtener semilla no se observaron muchos renuevos en las poblaciones, particularmente en las de menor elevación. Esto pudiera agravar el problema de pérdida de bosque por la extracción ilegal de madera y el cambio de uso de suelo, más los efectos de la reducción en los niveles de precipitación que han ocurrido con el cambio climático.

Además de la protección a los rodales fragmentados, sería recomendable la repoblación artificial a través del uso de semilla local de árboles que crezcan alrededor de cada población muestreada.

CONCLUSIONES

Los valores de germinación y desarrollo de las plántulas indican que no existen limitaciones por estos factores en el proceso de establecimiento de nuevos individuos de *Pinus montezumae* en las poblaciones del centro de México. A pesar de la alta fragmentación y baja densidad de árboles maduros en las poblaciones, los indicadores muestran alto porcentaje de germinación, siendo indicio de un correcto proceso de regeneración natural por semilla. La diferenciación morfológica de plántulas presenta el proceso de adaptación local a las condiciones climáticas y edáficas, particularmente las nutricionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Albaugh T. J., H. L. Allen, P. M. Dougherty and K. H. Johnsen (2004) Long term growth response of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. *Forest Ecology and Management* 192:3-19, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.002>
- Almqvist C., U. Bergsten, L. Bondesson and U. Eriksson (1998) Predicting germination capacity of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* seeds using temperature data from weather stations. *Canadian Journal of Forest Research* 28:1530-1535, <https://doi.org/10.1139/cjfr-28-10-1530>
- Binkley D. and R. F. Fisher (2020) *Ecology and Management of Forest Soils*. 5th edition. Wiley-Blackwell. Oxford, UK. 456 p, <https://doi.org/10.1002/9781119455745>
- Bishaw Z., M. Makkawi and A. A. Niane (2009) Seed quality and alternative seed delivery systems. In: *The Lentil: Botany, Production and Uses*. E. Erskine, F. J. Muehlbauer, A. Sarker and B. Sharma (eds.). CAB International. Dubai, United Arab Emirates. pp:350-367.
- Calama R., R. Manso, M. E. Lucas-Borja, J. M. Espelta, M. Piqué, F. Bravo, ... and M. Pardo (2017) Natural regeneration in Iberian pines: a review of dynamic processes and proposals for management. *Forest Systems* 26:eR02S, <https://doi.org/10.5424/fs/2017262-11255>
- Camacho F. (1994) Métodos de almacenamiento. In: *Semillas Forestales*. Publicación Especial No. 2. CENID-COMEF, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, D. F. pp:93-102.
- Capilla-Dinorin E., J. López-Upton, M. Jiménez-Casas y V. Rebolledo-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>
- Carles S., M. S. Lamhamedi, J. Beaulieu, D. C. Stowe, F. Colas and H. A. Margolis (2009) Genetic variation in seed size and germination patterns and their effect on white spruce seedling characteristics. *Silvae Genetica* 58:152-161, <https://doi.org/10.1515/sg-2009-0020>
- Castoldi E. and J. A. Molina (2014) Effect of seed mass and number of cotyledons on seed germination after heat treatment in *Pinus sylvestris* L. var. *iberica* Svob. *Forest Systems* 23:483-489, <https://doi.org/10.5424/fs/2014233-05480>
- Delgado-Valerio P. (1994) Evaluación de la capacidad productiva y eficiencia de semillas para tres especies del género *Pinus* (*P. montezumae* Lamb., *P. pseudostrobus* 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
- Dimkpa C., P. Bindraban, J. E. McLean, L. Gatere, U. Singh and D. Hellums (2017) Methods for rapid testing of plant and soil nutrients. In: Sustainable Agriculture Reviews. E. Lichtfouse (ed.). Springer. Cham, Switzerland. pp:1-43, https://doi.org/10.1007/978-3-319-58679-3_1
- Espejel M. J. (2019) La zona Metropolitana del Valle del México: arreglos formales y fragmentación. *Economía, Sociedad y Territorio* 19:241-271, <https://doi.org/10.22136/est20191335>
- 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>
- Fuentes-Amaro S. L., R. Rodríguez-Laguna, R. Razo-Zárate, J. Meza-Rangel, M. Jiménez-Casas y G. A. López-Zepeda (2020) Energía germinativa en árboles selectos de *P. patula* Schl. et Cham. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 7:69-78.
- Fuentes-Amaro S. L., R. Rodríguez-Laguna, R. Razo-Zárate, J. Meza-Rangel y M. Jiménez-Casas (2021) Variación altitudinal en emergencia y crecimiento inicial de plantas de *Pinus patula*. *Revista Fitotecnica Mexicana* 44:655-660, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.655>
- Ganatsas P., M. Tsakalimi and C. Thanos (2008) Seed and cone diversity and seed germination of *Pinus pinea* in Strofylia site of the Natura 2000 Network. *Biodiversity and Conservation* 17:2427-2439, <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9390-8>
- 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 Fitotecnica Mexicana* 33:297-304, <https://doi.org/10.35196/rfm.2010.4.297>
- Goszka A. R. and R. S. Snell (2020) Seed quality and seed quantity in red maple depends on weather and individual tree characteristics. *Ecology and Evolution* 10:13109-13121, <https://doi.org/10.1002/ece3.6900>
- Grigal D. F. and E. D. Vance (2000) Influence of soil organic matter on forest productivity. *New Zealand Journal of Forestry Science* 30:169-205.
- Hernández-Anguiano L. A., J. López-Upton, C. Ramírez-Herrera y A. Romero-Manzanares (2018) Variación en germinación y vigor de semillas de *Pinus cembroides* y *Pinus orizabensis*. *Agrociencia* 52:1161-1178.
- Herrera-Hernández R., J. López-Upton, L. Muñoz-Gutiérrez and C. Ramírez-Herrera (2024) Seed production potential of *Pinus montezumae* Lambert in central Mexico. *Ciencia Florestal* 34:e71911, <https://doi.org/10.5902/1980509871911>
- Joosen R. V. L., J. Kodde, L. A. J. Willems, W. Ligterink, L. H. W. van der Plas and H. W. M. Hilhorst (2010) Germinator: a software package for high-throughput scoring and curve fitting of Arabidopsis seed germination. *The Plant Journal* 62:148-159, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3113X.2009.04116.x>
- Khatun N. (2021) Applications of normality test in statistical analysis. *Open Journal of Statistics* 11:113-122, <https://doi.org/10.4236/ojs.2021.1111006>
- Leeper A. C., B. A. Lawrence and J. M. LaMontagne (2020) Plant-available soil nutrients have a limited influence on cone production patterns of individual white spruce trees. *Oecologia* 194:101-111, <https://doi.org/10.1007/s00442-020-04759-w>
- Lei J., H. Du, A. Duan and J. Zhang (2019) Effect of stand density and soil layer on soil nutrients of a 37-year-old *Cunninghamia lanceolata* plantation in Naxi, Sichuan Province, China. *Sustainability* 11:5410, <https://doi.org/10.3390/su11195410>
- 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>
- Lopez-Escobar N. F., A. Gómez-Guerrero, A. Velázquez-Martínez, A. M. Fierros-González, L. U. Castruita-Esparza y J. A. G. Vera-Castillo (2018) Reservorios y dinámica de nutrientes en dos rodales bajo aprovechamiento de *Pinus montezumae* Lamb. en Tlaxcala, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24:115-129, <https://doi.org/10.5154/rchscfa.2017.09.055>
- Mann W. F. (1979) Relationship of seed size, number of cotyledons, and initial growth of southern pines. Tree Planter' Notes. USDA Southern Forest Experiment Station. Pineville, Louisiana, USA. 3 p.
- Manzanilla Q. U., P. Delgado V., J. Hernández R., A. Molina S., J. J. García M. y M. C. Rocha G. (2019) Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta Botánica Mexicana* 126:e1398, <https://doi.org/10.21829/abm126.2019.1398>
- McCavour M. J., D. Paré, C. Messier, N. Thiffault and E. Thiffault (2014) The role of aggregated forest harvest residue in soil fertility, plant growth, and pollination services. *Soil Science Society of America Journal* 78:S196-S207, <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0373nafsc>
- Parker W. C., T. L. Noland and A. E. Morneauult (2006) The effects of seed mass on germination, seedling emergence, and early seedling growth of eastern white pine (*Pinus strobus* L.). *New Forests* 32:33-49, <https://doi.org/10.1007/s11056-005-3391-1>
- Parker W. C., T. L. Noland and A. E. Morneauult (2013) Comparative mast seed production in unmanaged and shelter wood white pine (*Pinus strobus* L.) stands in central Ontario. *New Forests* 44:613-628, <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9366-8>
- Romero-Rangel S., L. E. Rubio-Licona, L. Chávez-Serrano, E. C. Rojas-Zenteno y M. García-Pineda (2017) Comportamiento germinativo y crecimiento temprano de *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrobus* (Pinaceae). *BIOCYT Biología, Ciencia y Tecnología* 10:749-756, <https://doi.org/10.22201/fesi.20072082.2017.10.61719>
- 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* 14:143-65, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1297>
- Schlesinger W. H. and E. S. Bernhardt (2020) Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. 4th edition. Academic Press. San Diego, California, USA. 762 p, <https://doi.org/10.1016/C2012-0-01654-7>
- Takeuchi Y., S. Kikuchi and B. Diway (2020) Albinism and inbreeding depression in seedlings of the tropical tree, *Shorea laxa*. *Journal of Forest Research* 25:413-419, <https://doi.org/10.1080/13416979.2020.1796897>
- 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>
- Verdú M. and A. Traveset (2005) Early emergence enhances plant fitness: a phylogenetically controlled meta-analysis. *Ecology* 86:1385-1394, <https://doi.org/10.1890/04-1647>
- Wang T., A. Hamann, D. Spittlehouse and C. Carroll (2016) Locally downscaled and spatially customizable climate data for historical and future periods for North America. *PLoS ONE* 11:e0156720, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156720>
- White P. J. and E. J. Veneklaas (2012) Nature and nurture: the importance of seed phosphorus content. *Plant and Soil* 357:1-8, <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1128-4>
- Xu Y., N. Cai, B. He, R. Zhang, W. Zhao, J. Mao, ... and K. Woeste (2015) Germination and early seedling growth of *Pinus densata* Mast. provenances. *Journal of Forest Research* 27:283-294, <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0186-x>
- Zhang H., D. Zhou, C. Matthew, P. Wang and W. Zheng (2008) Photosynthetic contribution of cotyledons to early seedling development in *Cynoglossum divaricatum* and *Amaranthus retroflexus*. *New Zealand Journal of Botany* 46:39-48, <https://doi.org/10.1080/00288250809509752>