Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 17 (96)
Proyecto Estratégico Forestal (2026)

DOI: 10.29298/rmcf.v17i96.1647
Artículo de investigación

Variación adaptativa en caracteres morfológicos de plántulas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.

Adaptive variation in morphological traits of *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham. seedlings

Araceli Hernández López[1], Liliana Muñoz Gutiérrez[2], J. Jesús Vargas Hernández[3]*, Javier López Upton[3]

Fecha de recepción/Reception date: 24 de febrero de 2026.
Fecha de aceptación/Acceptance date: 2 de junio de 2026.

[1]Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. México.
[2]Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales, Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México.
[3]Colegio de Postgraduados, Posgrado en Ciencias Forestales, Campus Montecillo. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: vargashj@colpos.mx
*Corresponding author; e-mail: vargashj@colpos.mx

Resumen

La fase de establecimiento de las plantas leñosas está sujeta a fuertes presiones de selección, por ello las características morfológicas de las plántulas tienen un alto valor adaptativo y son importantes en los procesos de mejora genética. Los objetivos del presente estudio fueron determinar el valor adaptativo en características morfológicas de plántulas de *Pinus patula* y su relación con las condiciones geoclimáticas del sitio de origen de la semilla. La capacidad germinativa (*CG*), el número de cotiledones (*NC*), la longitud de cotiledones (*LC*) y la longitud de hipocótilo (*LH*) fueron evaluadas y correlacionadas con variables geoclimáticas del periodo 1991-2020 de los sitios de origen de las progenies. La variación genética entre familias resultó amplia; la mayor variación en *CG* registró valores promedio de 11 a 100 %. Con excepción del *NC*, la correlación entre las variables morfológicas con la latitud, longitud, temperatura media anual, temperatura del mes más cálido, fechas de inicio y término del periodo sin heladas, precipitación en forma de nieve y temperatura extrema varió de -0.29 a 0.66. Las semillas de sitios más al norte y al oeste, más cálidos y con mayor periodo libre de heladas, presentaron valores superiores de *CG*, *LC* y *LH*. La primera función canónica explicó 77 % de la variación entre variables morfológicas y geoclimáticas. Los resultados contribuyen a identificar los factores geoclimáticos que influyen en la adaptación de *Pinus patula* en etapas tempranas de desarrollo, para favorecer el vigor inicial de las plántulas y su adaptación durante la fase de establecimiento.

Palabras clave: Capacidad germinativa, correlaciones canónicas, diferenciación genética, evaluación temprana, rasgos morfológicos, selección natural.

Abstract

The seedling establishment stage of tree species is under strong selection pressures, so morphological traits of seedlings commonly show strong adaptive value and are relevant for genetic improvement purposes. The objectives were to determine the adaptive variation in morphological traits of *Pinus patula* seedlings and their relationships with the geoclimatic conditions at the seed's origin site. Germination capacity (*GC*), number of cotyledons (*NC*), cotyledon length (*CL*), and hypocotyl length (*HL*) were evaluated and correlated with geoclimatic variables during the 1991-2020 period at the progeny's origin sites. Genetic variation among families was wide; the greatest variation was observed in *GC* with average values ranging from 11 to 100 %. With the exception of *NC*, the correlation between morphological variables and latitude, longitude, mean annual temperature, temperature of the warmest month, beginning and ending dates of the frost-free period, snowfall, and extreme temperature ranged from -0.29 to 0.66. Seeds from sites further North and West, which were warmer and had a longer frost-free period, exhibited higher *GC*, *CL*, and *HL*. The first canonical function explained 77 % of variation among morphological and geoclimatic variables. The results help identify the geoclimatic factors that influence the adaptation of *Pinus patula* at early stages of development, thereby promoting the initial vigor of seedlings and their adaptation during the establishment phase.

Keywords: Germination capacity, canonical correlations, genetic differentiation, early evaluation, morphological traits, natural selection.

Introducción

En México, *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham. es una conífera con amplia distribución geográfica que se localiza entre los 18° y los 23°20' N y los 97° y los 99°45' O (Vela, 1980), en altitudes entre 1 800 y 3 100 m, con precipitación media anual >1 000 mm y temperatura media anual entre 10 y 20 °C (Rzedowski, 1978).

Este pino es de rápido crecimiento, con madera de alta calidad, facilidad de manejo y sus poblaciones naturales están adaptadas a distintas condiciones ambientales (Dvorak et al., 2000). Los ensayos de procedencia y progenies han contribuido al mejoramiento genético de la especie mediante la selección de fuentes de semilla y genotipos con mayor crecimiento y mejor adaptación a distintos sitios de plantación (Escobar-Sandoval et al., 2018; Morales-González et al., 2013; Salaya-Domínguez et al., 2012).

Debido a los largos periodos que implica el mejoramiento genético de especies forestales, asociados a la longevidad y las tasas de crecimiento de los árboles, la evaluación de progenies en campo requiere seguimiento periódico por más de 10 años (Adams et al., 2001; Badilla & Murillo, 2026). Uno de los enfoques para optimizar este proceso es el uso de selección temprana, que se basa en tomar características expresadas en etapas juveniles para predecir el desempeño en edades posteriores (Adams et al., 2001; Vargas-Hernández & Adams, 1992). Sin embargo, para que esa estrategia sea eficiente, los rasgos deben presentar alta heredabilidad y estar fuertemente correlacionados con el desempeño en edad adulta (Badilla & Murillo, 2026; Farfán-Vázquez et al., 2002).

Una mayor capacidad germinativa y tasa de crecimiento inicial de las plántulas proporcionan ventajas competitivas que pueden tener un efecto duradero en las siguientes etapas de desarrollo (Christie et al., 2022). Además, la fase inicial de crecimiento, después de la germinación, representa una etapa vital en la historia de vida de las plantas, es sujeta a fuerte presión de selección (Larson et al., 2020) y crítica para el establecimiento y desarrollo posterior de los individuos (Duncan et al., 2019; Leger et al., 2019), con un importante valor adaptativo a factores adversos (Barton et al., 2020; Metz et al., 2018; Welles & Funk, 2021).

Aunque existen estudios sobre la variación intraespecífica y el valor adaptativo de las características en etapas tempranas de las plantas (Caruso et al., 2019; Larson et al., 2020; Welles & Funk, 2021), hay muy poca información en el caso de especies leñosas y, en especial de *P. patula* (Pérez-Luna et al., 2024); y se requiere mayor información de la variación genética en los rasgos de las plántulas, moldeada por la selección natural bajo condiciones geoclimáticas específicas (Singh et al., 2015). La evaluación de esta variabilidad constituye una herramienta clave para identificar los rasgos morfológicos de las plántulas con valor adaptativo superor para reducir los riesgos de establecimiento y mala adaptación de plantaciones en un contexto de cambio climático (Christie et al., 2022; Hamann et al., 2000; Singh et al., 2015).

Una amplia diferenciación genética se verifica en poblaciones naturales del género *Pinus* respecto a sus caracteres fenotípicos como el tamaño de la semilla, la capacidad

y la tasa de germinación (Ghildiyal et al., 2009). El tamaño de la semilla se puede asociar con variables geoclimáticas del sitio de origen, incluidas la latitud, la longitud, la altitud, la temperatura y la precipitación (Loha et al., 2006), que a su vez influyen de manera significativa en el vigor y la germinación total (Farahani et al., 2011; Hojjat, 2011; Rawat & Bakshi, 2011; Singh et al., 2015) y en el crecimiento inicial de las plántulas (Farahani et al., 2011; Loha et al., 2006; Rawat & Bakshi, 2011).

Por otro lado, la capacidad germinativa está fuertemente influida por factores abióticos como la temperatura y el estrés hídrico (George-Miranda et al., 2022); además, puede afectar la calidad de las plántulas en su crecimiento (Singh & Thapliyal, 2012; Wahid & Bounoua, 2013) y su establecimiento en el sitio de plantación (Castoldi & Molina, 2014). Otro rasgo relevante es el número de cotiledones, el cual presenta un efecto materno asociado al tamaño de la semilla (Callejas-Díaz et al., 2022). En *Pinus sylvestris* L. el mayor número de cotiledones se relaciona con más crecimiento en altura (Ulusan & Bilir, 2008). Estas características son relevantes en los procesos de selección y mejora genética tanto por su valor adaptativo en edades tempranas, como por su relación potencial con el desempeño en edades posteriores (Morales-González et al., 2013).

En este contexto, los objetivos del presente estudio fueron: (1) determinar la variación adaptativa en la capacidad germinativa y en las características morfológicas iniciales de plántulas de *P. patula* procedentes de diferentes regiones de México; (2) analizar la correlación entre variables morfológicas de plántulas y variables geoclimáticas del sitio de origen de la semilla; y (3) evaluar diferencias entre familias con base en su desarrollo inicial. La hipótesis fue que la capacidad germinativa y las características morfológicas iniciales de las plántulas varían entre las fuentes de germoplasma y están asociadas a las condiciones ambientales del sitio de origen.

Materiales y Métodos

Muestras de semillas

El estudio incluyó 59 lotes de semilla de árboles individuales (familias de polinización libre) de distintas regiones del área de distribución natural de la especie: 28 familias de Veracruz, seis de Puebla, 10 de Hidalgo y 15 provenientes de un huerto semillero asexual (HSA) de segunda generación establecido en Aquixtla, Puebla, con materiales originarios de Tlaxcala, Hidalgo, Puebla, Tamaulipas y Veracruz. Las coordenadas geográficas de los sitios de origen de las 59 familias incluidas en el estudio se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Sitios de origen de los lotes de semillas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.

Familia	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (m)
HS-15R	19°40'	98°05'	2 750
HS-64R	19°40'04.2"	98°05'0.0"	3 020
HS-10S	19°43'07.6"	98°00'07.2"	3 121
HS-12C	19°43'17.3"	97°59'49.2"	3 069
HS-117C	19°43'18.1"	97°59'51.1"	3 097
HS-23S	19°43'24.1"	97°59'33.8"	2 997
HS-34S	19°43'45.2"	97°59'17.7"	2 916
HS-36S	19°43'52.0"	97°59'25.3"	2 892
HS-58C	19°44'03.7"	97°59'08.2"	2 829
HS-37R	20°09'	98°10'	2 460
HS-02R	20°24'	98°25'	2 400
HS-17R	20°29'	98°28'	2 833
HS-25R	20°53'	99°13'	2 525
HS-72R	20°39'10.9"	98°40'02.5"	2 020

HS-10R	23°56'	99°28'	1 780
R2-43	18°38’03.3"	97°07’34.0"	2 445
R2-55	18°49’53.0"	97°17’12.4"	2 427
R3-12	19°45'15.4"	97°32'04.6"	2 484
R3-11	19°45'38.0"	97°30'53.4"	2 651
R3-09	19°45'53.0"	97°31'17.8"	2 548
R2-21	19°21’34.3"	97°07’52.9"	1 988
R2-23	19°21’59.8"	97°07’54.9"	2 096
R2-27	19°26’09.0"	97°05’30.3"	2 125
R2-25	19°26’16.0"	97°05’31.9"	2 141
R2-18	19°30’40.8	97°05’06.0"	2 824
R2-16	19°30’42.8"	97°05’14.8"	2 864
R2-14	19°30’55.1"	97°05’30.8"	2 912
R2-15	19°30’55.8"	97°05’48.3"	2 919
R2-20	19°31’09.1"	97°05’30.4"	2 908
R2-62	19°35’47.8"	97°01’45.1"	2 234
R2-06	19°37’46.8"	97°03’54.8"	2 362
R2-07	19°37’50.5"	97°03’57.9"	2 365
R2-04	19°38’23.4"	97°05’21.9"	2 405
R2-02	19°38’30.4"	97°05’07.9"	2 380
R2-01	19°39’14.0"	97°05’35.6"	2 378
R2-64	19°40’56.2"	97°01’50.5"	2 106
R2-63	19°43’11.2"	97°01’41.9"	2 357
R3-18	20°04'04.2"	98°06'20.3"	2 414
R3-24	20°04'14.1"	98°06'47.8"	2 364
R3-21	20°04'54.5"	98°06'32.2"	2 270
R3-72	20°12'58.3"	98°12'02.1"	2 208
R3-51	20°27'03.0"	98°28'07.3"	2 600
R3-53	20°27'19.1"	98°27'50.1"	2 547
R3-55	20°27'59.0"	98°28'16.4"	2 469
R3-57	20°28'02.5"	98°28'01.2"	2 453
R3-42	20°34'20.0"	98°31'07.1"	1 903
R3-47	20°34'27.8"	98°30'08.9"	2 064
R3-48	20°34'29.5"	98°34'29.5"	2 000
R3-46	20°34'31.2"	98°30'14.8"	2 067
R3-43	20°35'08.1"	98°31'10.4"	1 911

R3-35	20°37'27.8"	98°35'44"	2 037
R3-33	20°37'30.4"	98°36'07.5"	2 091
R3-32	20°37'36.7"	98°36'12.1"	2 089
R3-31	20°37'41.1"	98°36'15.4"	2 050
R3-27	20°39'55.7"	98°42'21.7"	2 129
R3-29	20°40'03.8"	98°42'15.7"	2 145
R3-66	20°55'01.9"	98°55'59.8"	2 137
R3-68	20°55'05.2"	98°55'48.2"	2 143
R3-67	20°55'05.4"	98°56'03.7"	2 192

Establecimiento del ensayo

El ensayo se realizó en un invernadero con cubierta plástica de 180 micras, en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (Cenid Comef) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP); la temperatura promedio fue de 21 °C, con humedad relativa promedio de 65 %.

Por cada familia, se utilizaron 60 semillas llenas; remojadas durante 24 h en agua destilada con 5 % de peróxido de hidrógeno. Posteriormente, se sembraron en tubetes de polietileno rígido, de color negro, con guías de raíces internas, de 4.8 cm de diámetro superior, 21 cm de largo y 170 mL, colocados en charolas de 54 cavidades. Cada tubete se identificó con una clave del árbol y sitio de origen. El sustrato consistió en una mezcla de turba de musgo *Lambert*®, perlita *Coarse*® y vermiculita *Verlite*® en proporción 60:20:20, con la adición de 5 g L^{-1} de fertilizante de liberación controlada marca *Multicote*® (Israel) (18-06-12+Em) para ocho meses.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco repeticiones por familia y unidades experimentales de 12 semillas. Durante el periodo de estudio, las plántulas se regaron con agua potable tres veces por semana y se aplicó fungicida (2 g L^{-1}) marca *Captán*® WP (*USA*) una vez por semana para prevenir ataques fúngicos.

Evaluación de la germinación y variables morfológicas

Para fines del estudio, la capacidad germinativa (*CG*) se determinó con base en el número de plántulas emergidas del sustrato a los 30 días después de la siembra, se consideró que en condiciones naturales la germinación termina en el momento en que la plántula emerge del suelo y se vuelve autótrofa (Bareke, 2018). Para obtener el porcentaje de germinación final se utilizó la ecuación de la Asociación Internacional de Evaluación de Semillas (International Seed Testing Association [ISTA], 2024), en la cual el número de plántulas emergidas fue equivalente al número de semillas germinadas:

$$CG(\%) = \left(\frac{semillas\ germinadas}{semillas\ totales}\right) \times 100 \qquad (1)$$

A los 45 días después de la siembra, la longitud de cotiledones (*LC*, cm) y de hipocótilo (*LH*, cm) se midió con una regla graduada *Baco*®, y el número de cotiledones (*NC*) se determinó por conteo directo. De los 59 lotes sembrados se excluyeron del análisis 12 lotes que no germinaron; de los otros 47 que germinaron se obtuvo información de los caracteres evaluados (*CG*, *NC*, *LC* y *LH*).

Variables geoclimáticas

A partir de la latitud, longitud y altitud del sitio de origen de cada familia, se obtuvieron las normales climáticas del periodo 1991-2020 mediante *ClimateNA_v7.50* (Center for Forest Conservation Genetics, 2023).

Análisis estadístico

El cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de las variables evaluadas, se verificó con la prueba de *Kolmorov-Smirnov* y *Levene*, respectivamente. La variable *CG* no cumplió con los supuestos (p>0.10), por lo que para su análisis se utilizó el procedimiento *Glimmix*, con la función de enlace de la distribución binomial, en donde la planta emergida se consideró el caso de éxito (*i. e.*, con valor de 1) y la no emergida como no éxito (0). Mientras que, las variables *NC* (p<0.10), *LC* y *LH* (p<0.09) fueron lo suficientemente robustas con respecto a la distribución normal, por lo que en ellas se aplicó el procedimiento *Mixed* de *SAS*® V9.2 (SAS Institute Inc., 2012). El modelo lineal empleado en ambos casos fue:

$$Y_{ijk} = \mu + b_i + F_j + b_i F_j + e_{ijk} \qquad (2)$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor de la observación en la *k*-ésima planta de la *j*-ésima familia en el *i*-ésimo bloque

μ = Media de la población

b_i = Efecto fijo del *i*-ésimo bloque

F_j = Efecto aleatorio de la *j*-ésima familia

$b_i F_j$ = Efecto aleatorio de la interacción del *i*-ésimo bloque con la *j*-ésima familia

e_{ijk} = Error experimental

Los resultados del ANOVA permitieron estimar los valores promedio por familia de las variables evaluadas. En el caso de *CG*, la probabilidad de los casos de éxito (*i. e.*, plántulas emergidas) en cada familia proporcionó de manera automática el valor de *CG* en fracciones decimales.

Para determinar el valor adaptativo de las variables morfológicas de las plántulas, se realizó un análisis de correlación con las variables geoclimáticas de los sitios de origen de las familias. Después de eliminar las variables geoclimáticas redundantes ($r>0.9$), es decir aquellas con alta correlación se excluyó una de ellas en el análisis final, conservando 15 para los análisis posteriores. Las variables que no fueron excluidas se incorporaron a un segundo análisis de correlaciones de *Pearson* con las variables morfológicas, para determinar las posibles interrelaciones entre ambos grupos de variables. La *CG* (expresada en % para cada familia) se transformó con la función *logit* (Seiffert et al., 2024) para aproximarla a una distribución normal, previo al análisis de correlación con las variables geoclimáticas.

Las variables geoclimáticas de interés fueron: latitud (*LAT*), longitud (*LONG*), elevación (*ELEV*), temperatura media anual (*TMA*), temperatura media del mes más cálido (*TMMC*), temperatura de continentalidad (*TC*=), precipitación media anual (*MAP*), índice de calor (*IC*), día en el que comienza (*iPLH*) y termina (*tPLH*) el periodo libre de heladas, precipitación en forma de nieve (*PFN*), temperatura extrema del periodo 1991-2020 (*TEX*), evaporación de referencia de *Hargreaves* (*Eref*), déficit de humedad climática de *Hargreaves* (*DHC*) y humedad relativa media anual (*HR*). Posteriormente, se efectuó un análisis de correlaciones canónicas entre ambos grupos de variables mediante el procedimiento *CANCORR* de *SAS*® V9.2 (SAS Institute Inc., 2012).

Resultados y Discusión

Medias de las variables morfológicas por familia

El análisis de varianza (ANOVA) indicó variación altamente significativa ($p<0.001$) entre familias para las variables evaluadas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores promedio (±error estándar) y de familias extremas (mínimo y máximo) de capacidad germinativa y características morfológicas de plántulas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.

Característica	Promedio general	Valores de familias extremas	
		Mínimo	Máximo
Capacidad germinativa (%)	55.7±0.8	11.0	100.0
Número de cotiledones	5.2±0.1	4.6	7.0
Longitud de cotiledones (cm)	2.0±0.1	1.5	2.6
Longitud de hipocótilo (cm)	2.5±0.1	1.9	3.1

El número promedio de hojas cotiledonares varió hasta en 2.4 hojas entre familias procedentes de diferentes sitios de origen (Cuadro 1), 81 % de las plántulas tuvieron cinco y seis cotiledones, 15.4 % cuatro, y 3.8 % de siete a ocho cotiledones. Los valores promedio de *LC* y *LH* a nivel de familia variaron en 73 % y 63 %, respectivamente.

Los bajos porcentajes de germinación en algunas familias (excluidas y no excluidas en la prueba), especialmente las procedentes de Veracruz, pueden resultar de la asincronía en los periodos de receptividad femenina y dispersión de polen, falta de

polen, o al aislamiento de los árboles en los sitios de recolecta con un número reducido de individuos participantes; lo que generalmente ocasiona posibles problemas de endogamia y reducción del flujo genético (Capilla-Dinorin et al., 2021; Juárez-Agis et al., 2006).

Sin embargo, la baja germinación en algunas familias de Veracruz también es factible que responda al almacenamiento de la semilla a temperatura ambiente durante un año; mientras que, las semillas del HSA que tuvieron mayores valores de germinación, fueron recolectadas durante el mismo año en el que se llevó a cabo el ensayo. En coníferas, la longevidad y vigor de la semilla dependen críticamente de las condiciones de almacenamiento y del contenido de humedad (Corbineau, 2024). En los dos grupos de lotes de semilla (los almacenados a temperatura ambiente y los recolectados el año del estudio) hubo diferencias entre lotes, lo que indica un efecto genético combinado con la respuesta fisiológica a las condiciones de manejo y almacenamiento previo a su germinación.

Correlaciones entre características

La *CG*, *LC* y *LH* se correlacionaron positivamente, de manera significativa ($p<0.05$), con la latitud y longitud del sitio de origen (Cuadro 3). Además, *LH* presentó correlaciones moderadas positivas ($p<0.05$) con *TMA*, *TMMC*, *tPLH* y *TEX*, y moderadas negativas ($p<0.05$) con *iPLH* y *PFN*. Esto indica que plántulas obtenidas de semillas procedentes de ambientes más cálidos y con periodos libres de heladas más prolongados tienden a tener hipocótilo de mayor tamaño (Ranade & García-Gil, 2021).

Cuadro 3. Correlación de *Pearson* entre las características de las progenies y variables geoclimáticas.

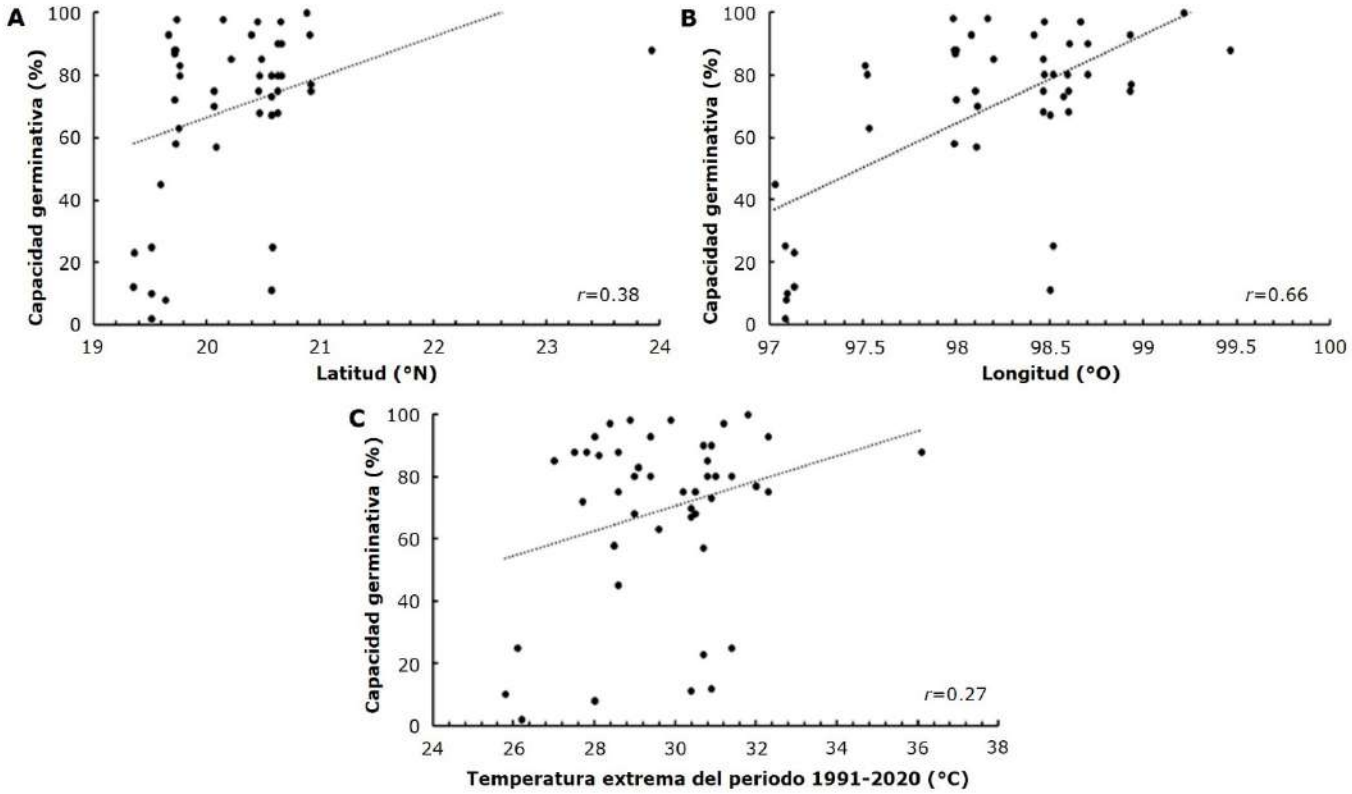
CP	Latitud	Longitud	*TMA*	*TMMC*	*iPLH*	*tPLH*	*PFN*	*TEX*
CG	0.36**	0.64**	0.03	0.09	0.10	-0.02	-0.11	0.28*
NC	0.01	-0.09	-0.21	-0.19	0.21	-0.20	0.16	-0.17
LC	0.36*	0.52**	0.08	0.14	-0.04	0.09	-0.09	0.24
LH	0.30*	0.40**	0.31*	0.33*	-0.31*	0.33*	-0.29*	0.36*

CP = Características de las progenies. *CG* = Capacidad germinativa (%); *NC* = Número de cotiledones; *LC* = Longitud de cotiledones (cm); *LH* = Longitud de hipocótilo (cm); *TMA* = Temperatura media anual; *TMMC* = Temperatura media del mes más cálido; *iPLH* = Día en el que comienza el periodo libre de heladas; *tPLH* = Día del año en el que termina el periodo libre de heladas; *PFN* = Precipitación en forma de nieve; *TEX* = Temperatura extrema de 1991-2020. *Significativo con 0.05 y ** con 0.01.

Por otro lado, *CG* se asoció de manera débil y positiva, pero significativa ($p<0.05$) con *TEX*, lo que sugiere una ligera adaptación (genética) a condiciones térmicas extremas, relacionada con diferencias en la respuesta en respiración y consumo de reservas durante el manejo y almacenamiento de las semillas a diferentes temperaturas (Cai et al., 2025).

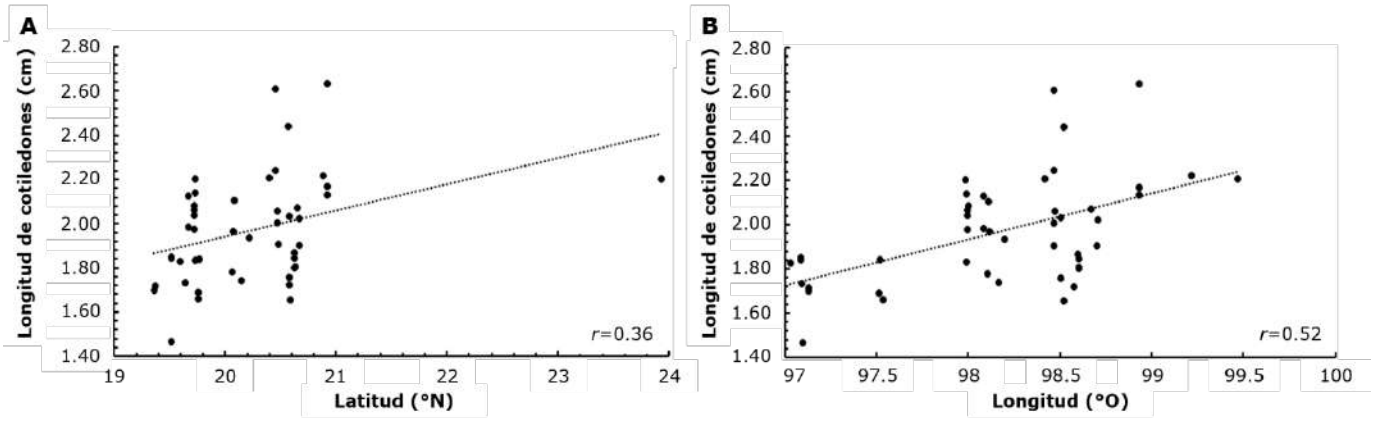
La tendencia observada hacia mayores valores de *CG* y *LC* en familias distribuidas más al norte y al oeste, ubicadas hacia la Sierra Madre Oriental, se puede interpretar como una respuesta adaptativa a regímenes térmicos específicos (Figura 1A, 1B y 1C) y a la presencia de plántulas con mayor tamaño en *LC* (Figura 2A y 2B). Al respecto, Cai et al. (2016) determinaron que las semillas procedentes de poblaciones con climas más cálidos crecen más rápido, y la función de los cotiledones como reservas durante el crecimiento (Zhang et al., 2008) y la fotosíntesis son más importantes que la expansión de las acículas primarias (Sasaki & Kozlowski, 1970); también, se debe a un posible efecto materno, ya que semillas producidas en entornos fríos tienen una capacidad de

germinación menor a las producidas en entornos relativamente cálidos como es el caso de la *Poa alpina* L. (Hermesh & Acharya, 1992).



A = Latitud; B = Longitud; C = Temperatura máxima extrema durante el periodo 1991-2020.

Figura 1. Correlación entre la capacidad germinativa (*CG*) con la latitud, longitud y temperatura máxima extrema durante el periodo 1991-2020 del sitio de origen de las semillas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.



A = Latitud; B = Longitud.

Figura 2. Correlación entre la longitud de cotiledones (*LC*) con la latitud y longitud del sitio de origen de las semillas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.

Velasco-García y Hernández-Hernández (2024) señalan que un periodo libre de heladas más largo beneficia la *CG* en *Pinus oocarpa* Schiede *ex* Schltdl. Estos autores y Capilla-Dinorin et al. (2025) en *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen no reconocieron una asociación significativa de *NC* con las variables ambientales del sitio de origen, similar a lo identificado en el presente trabajo. Pero en el trabajo con *P. chiapensis* sí se definió una asociación significativa, alta y positiva de *LC* con la altitud, y negativa con la temperatura y la precipitación media anual (Capilla-Dinorin et al., 2025); aunque, no establecieron una asociación significativa de *NC* con las variables ambientales del sitio de origen, similar a lo obtenido en el estudio aquí descrito.

Juárez-Agis et al. (2006) también concluyeron que el porcentaje de germinación de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco fue superior en las poblaciones de mayor latitud, procedentes del norte de México, con respecto a la semilla de poblaciones del centro y sur del país. De acuerdo con Rehfeldt (1993) factores geográficos como latitud, longitud y altitud tienen fuerte influencia sobre la selección natural en especies forestales, sobre todo en edades tempranas de desarrollo. La latitud es una variable relevante en la diferenciación genética entre poblaciones de coníferas en México, dado que estas se distribuyen principalmente en las cadenas montañosas que se extienden en dirección norte-sur (Sáenz-Romero, 2004).

Correlaciones canónicas

La primera función canónica (F1) explicó 77 % de la variación conjunta entre las cuatro características de las plantas y las 15 variables geoclimáticas (r=0.83, p=0.001). Las otras tres funciones resultaron no significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Valores y significancia estadística de las correlaciones canónicas entre las características de las progenies y las variables geoclimáticas del sitio de origen de las semillas de *Pinus patula* Schiede *ex* Schltdl. & Cham.

Número de función canónica	Correlación canónica	Correlación canónica ajustada	Error estándar aproximado	Correlación canónica cuadrada	*Pr>F*
F1	0.88	0.83	0.03	0.77	0.001
F2	0.76	0.67	0.06	0.57	0.261
F3	0.52	0.31	0.11	0.27	0.898
F4	0.40	0.21	0.12	0.16	0.909

La *CG* presentó el mayor coeficiente canónico, seguida de la *LC* (Cuadro 5), lo que indica que un aumento en la característica ocasiona un incremento en el valor de la función canónica integrada, mientras que los coeficientes de *NC* y *LH* fueron negativos; es decir, un aumento en el valor de la característica ocasiona una reducción en el valor de la función canónica.

Cuadro 5. Coeficientes canónicos estandarizados de las características de las progenies en las cuatro funciones (F1-F4).

Característica	F1	F2	F3	F4
Capacidad germinativa (%)	0.8585	0.6442	0.5566	-0.7008
Número de cotiledones	-0.1883	-0.1668	1.0686	-0.5769
Longitud de cotiledones (cm)	0.2452	-0.4728	-0.2066	1.4012
Longitud de hipocótilo (cm)	-0.1405	-0.8943	-0.1353	-0.883

En el caso de las variables geoclimáticas, *TMMC* (8.11), *TEX* (-4.21) e *iPLH* (3.46) fueron las más importantes; aunque el peso o contribución de *TMMC* e *iPLH* a la función canónica fue positivo, mientras que el de *TEX* resultó negativo. Lo anterior significa que las características de las progenies más sensibles a los cambios en la función canónica que maximiza las correlaciones con las variables ambientales fueron *CG* y *LC*; mientras que las variables climáticas que más influyeron en su respectiva función canónica 1 fueron *TMMC*, *TEX* e *iPLH* en el sitio de origen de las progenies.

Velasco-García y Hernández-Hernández (2024) documentaron que en *P. oocarpa* los árboles de sitios más cálidos se asociaron con una menor emergencia de plántulas; sin embargo, en el presente estudio la mayor germinación de *P. patula* se dio en las semillas procedentes de lugares más cálidos, lo que puede atribuirse a diferencias interespecíficas en las estrategias adaptativas o en la historia evolutiva de ambos taxa, como se ha demostrado para diferentes rasgos funcionales en otras especies leñosas (Liu et al., 2022). Sin embargo, explicar el origen de las diferencias en los mecanismos adaptativos durante la fase inicial de crecimiento de las plantas entre *P. patula* y *P. oocarpa* está fuera del propósito del trabajo, ya que requiere de un estudio conjunto mucho más amplio.

Los coeficientes canónicos son útiles para identificar las localidades más promisorias en la selección de sitios para la obtención de germoplasma con rasgos fenotípicos con mayor valor adaptativo (Blanco-Pastor et al., 2021), como el vigor inicial de las plantas. Las características de las plántulas asociadas con un mayor vigor inicial, además de generar ventajas competitivas con impactos positivos en etapas posteriores (Christie et al., 2022), tienen un valor adaptativo importante durante la fase de establecimiento de las plantas, en la que generalmente están sujetas a fuertes presiones de selección por diversos factores (Barton et al., 2020; Larson et al., 2020; Welles & Funk, 2021); especialmente en las condiciones actuales de calentamiento global (Christie et al., 2022). Determinar el grado de asociación entre las variables de crecimiento y las ambientales también permite seleccionar los mejores individuos adaptados a ambientes específicos y mejorar su productividad (Singh et al., 2015).

Implicaciones en el manejo de recursos genéticos

La variación significativa entre familias en la capacidad germinativa y caracteres morfológicos de las plántulas indica una diferenciación genética en etapas iniciales del ciclo de vida de *P. patula*. En coníferas, estos rasgos poseen relevancia adaptativa ya que influyen directamente en el establecimiento, supervivencia y éxito reproductivo posterior, el cual es un componente de la aptitud de estas especies (Rehfeldt, 1993; Sáenz-Romero, 2004). Las correlaciones de los rasgos de las plántulas con factores geoclimáticos como la latitud y variables térmicas evidencian que las poblaciones de ambientes más cálidos y con periodos libres de heladas más prolongados presentan mayor vigor en su fase temprana de desarrollo. Este patrón puede interpretarse como producto de selección natural que favorece genotipos con mayor crecimiento inicial en ambientes en los que la ventana de crecimiento es amplia y el riesgo de daño por heladas es menor (Rehfeldt, 1993).

Las diferencias detectadas en *P. patula* pueden reflejar procesos históricos de selección natural vinculados a la topografía montañosa y orientación norte-sur de las sierras mexicanas, donde pequeños cambios en latitud y altitud implican contrastes climáticos significativos.

La función canónica F1 confirma que la covariación entre rasgos morfológicos y clima es, en cierta medida, de origen genético, con valor adaptativo. La alta contribución de *CG* y *LC* sugiere que estos caracteres concentran una porción relevante de la varianza adaptativa en las etapas iniciales del establecimiento de las plántulas.

El efecto de factores climáticos, como *TMMC* y *TEX*, sugiere que la diferenciación genética sigue gradientes climáticos más que solo las distancias geográficas; esto es, muestra indicios de adaptación local (Sáenz-Romero, 2004). No obstante, parte de la variación en la capacidad germinativa y tamaño inicial podría incluir efectos maternos, especialmente si se consideran diferencias en calidad y almacenamiento de la semilla. En especies forestales, los efectos maternos pueden a nivel juvenil determinar la

expresión fenotípica sin implicar necesariamente diferencias genéticas. El patrón observado coincide de manera parcial con lo citado en otras especies de coníferas mexicanas, como *Pseudotsuga menziesii* (Juárez-Agis et al., 2006) y *Pinus chiapensis* (Capilla-Dinorin et al., 2021, 2025); lo que respalda la hipótesis de diferenciación clinal. Sin embargo, las discrepancias interespecíficas, como las observadas en *P. oocarpa* (Velasco-García & Hernández-Hernández, 2024) muestran que la evolución puede diferir entre especies, aun bajo gradientes ambientales similares.

En conjunto, los resultados sugieren que *P. patula* presenta adaptación diferencial en edades tempranas, asociada principalmente a gradientes geográficos y térmicos. Este patrón es afín a modelos de selección natural en diferentes ambientes, donde la presión selectiva varía a lo largo del paisaje, generando diferenciación poblacional.

La identificación de los principales factores geoclimáticos que influyen sobre el valor adaptativo de los rasgos morfológicos de las plantas durante su fase de establecimiento en campo es de gran utilidad para orientar las acciones más adecuadas en el manejo de los recursos genéticos de la especie, especialmente en el contexto del cambio climático. Por ejemplo, la información es útil para localizar sitios apropiados de recolección de semillas y utilización correcta del germoplasma en los programas de plantaciones y reforestación, así como para la transferencia de germoplasma en diferentes regiones geográficas del área de distribución de la especie y para establecer unidades productoras de germoplasma del taxón.

Conclusiones

Existe amplia variación entre las progenies evaluadas en la capacidad germinativa de la semilla y los caracteres morfológicos de las plántulas. Particularmente, la capacidad germinativa, la longitud de cotiledones y de hipocótilo tienen un valor adaptativo, ya que se asocian de manera significativa con algunas de las variables geoclimáticas del sitio de

origen de las progenies. Las variables geoclimáticas más importantes son latitud, longitud y temperatura extrema del periodo 1991-2020.

Las asociaciones detectadas reflejan tanto diferenciación genética adaptativa, como posibles efectos maternos. Sin embargo, la diferenciación en rasgos morfológicos de valor adaptativo en las etapas tempranas de desarrollo de las plantas es de gran utilidad para establecer medidas adecuadas de manejo de los recursos genéticos de la especie en el contexto del cambio climático, que permitan a las plantas enfrentar eventos más frecuentes e intensos de estrés ambiental durante la fase de establecimiento en campo.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias a través de los recursos fiscales con el proyecto "Manejo integrado de recursos forestales para la sustentabilidad de los servicios ecosistémicos ante el cambio climático", con el número SIGI 8491236185.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses. Liliana Muñoz Gutiérrez declara no haber participado en ninguna de las etapas del proceso editorial del artículo.

Contribución por autor

Araceli Hernández López: trabajo de campo y elaboración de la primera versión del manuscrito; Liliana Muñoz Gutiérrez: organización de la investigación, trabajo de campo y redacción; J. Jesús Vargas Hernández: análisis de datos, interpretación de resultados y redacción del manuscrito; Javier López Upton: redacción y corrección del manuscrito.

Referencias

Adams, W. T., Aitken, S. N., Joyce, D. G., Howe, G. T., & Vargas-Hernández, J. (2001). Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal Douglas-fir. *Silvae Genetica*, *50*(3-4), 167-175. https://pnwtirc.forestry.oregonstate.edu/evaluating-efficacy-early-testing-stem-growth-coastal-douglas-fir

Badilla, Y., & Murillo, O. (2026). Optimal age for selection in breeding clonal *Tectona grandis*. *Silvae Genetica*, *75*(1), 1-8. https://doi.org/10.2478/sg-2026-0001

Bareke, T (2018). Biology of seed development and germination physiology. *Advances in Plants & Agriculture Research*, *8*(4), 336-346. https://www.doi.org/10.15406/apar.2018.08.00335

Barton, K. E., Jones, C., Edwards, K. F., Shiels, A. B., & Knight, T. (2020). Local adaptation constrains drought tolerance in a tropical foundation tree. *Journal of Ecology*, *108*(4), 1540-1552. https://doi.org/10.1111/1365-2745.13354

Blanco-Pastor, J. L., Barre, P., Keep, T., Ledauphin, T., Escobar-Gutiérrez, A., Roschanski, A. M., Willner, E., Dehmer, K. J., Hegarty, M., Muylle, H., Veeckman, E., Vandepoele, K., Ruttink, T., Roldán-Ruiz, I., Manel, S., & Sampoux, J.-P. (2021). Canonical correlations reveal adaptive loci and phenotypic responses to climate in perennial ryegrass. *Molecular Ecology Resources*, *21*(3), 849-870. https://doi.org/10.1111/1755-0998.13289

Cai, H., Shao, J., & Shen, Y. (2025). Seed storability in forest trees: research progress and future perspectives. *Forests*, *16*(3), Article 467. https://doi.org/10.3390/f16030467

Cai, N., Xu, Y., Chen, S., He, B., Li, G., Li, Y., & Duan, A. (2016). Variation in seed and seedling traits and their relations to geo-climatic factors among populations in Yunnan Pine (*Pinus yunnanensis*). *Journal of Forest Research*, *27*, 1009-1017. https://doi.org/10.1007/s11676-016-0228-z

Callejas-Díaz, M., Chambel, M. R., San-Martín-Lorén, J., Gea-Izquierdo, G., Santos-del-Blanco, L., Postma, E., & Climent, J. M. (2022). The role of maternal age, growth,

and environment in shaping offspring performance in an aerial conifer seed bank. *American Journal of Botany*, *109*(3), 366-376. https://doi.org/10.1002/ajb2.1811

Capilla-Dinorin, E., López-Upton, J., Jiménez-Casas, M., & Pérez-Luna, A. (2025). Supervivencia y crecimiento inicial de *Pinus chiapensis* en gradientes ambientales de Puebla y Veracruz. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *12*(3), Artículo e4739. https://doi.org/10.19136/era.a12n3.4739

Capilla-Dinorin, E., López-Upton, J., Jiménez-Casas, M., & Rebolledo-Camacho, V. (2021). Características reproductivas y calidad de semilla en poblaciones fragmentadas de *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *44*(2), 211-219. https://doi.org/10.35196/rfm.2021.2.211

Caruso, C. M., Maherali, H., & Martin, R. A. (2019). A meta-analysis of natural selection on plant functional traits. *International Journal of Plant Sciences*, *181*(1), 44-55. https://doi.org/10.1086/706199

Castoldi, E., & Molina, J. A. (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*(3), 483-489. https://doi.org/10.5424/fs/2014233-05480

Center for Forest Conservation Genetics. (2023). *ClimateNA_MAP* (version 7.42) [Climate database]. University of British Columbia. https://climatena.ca/mapversion

Christie, K., Pierson, N. R., Lowry, D. B., & Holeski, L. M. (2022). Local adaptation of seed and seedling traits along a natural aridity gradient may both predict and constrain adaptive responses to climate change. *American Journal of Botany*, *109*(10), 1529-1544. https://doi.org/10.1002/ajb2.16070

Corbineau, F. (2024). The effects of storage conditions on seed deterioration and ageing: how to improve seed longevity. *Seeds*, *3*(1), 56-75. https://doi.org/10.3390/seeds3010005

Duncan, C., Schultz, N., Lewandrowski, W., Good, M. K., & Cook. S. (2019). Lower dormancy with rapid germination is an important strategy for seeds in an arid zone with unpredictable rainfall. *PLoS One*, *14*(9), Article e0218421. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218421

Dvorak, W. S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., & Stanger, T. K. (2000). *Pinus patula*. In Central America and Mexico Coniferous Resources Cooperative (Ed.), *Conservation & testing of tropical & subtropical forest tree species* (pp. 148-173). College of Natural Resources. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20003029405

Escobar-Sandoval, M. C., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Espinosa-Zaragoza, S., & Borja-de la Rosa, A. (2018). Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, *24*(2), Artículo e2421595. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421595

Farahani, H. A., Moaveni, P., & Maroufi, K. (2011). Effect of seed size on germination percentage in green gram (*Vigna radiata* L.). *Advances in Environmental Biology*, *5*(7), 1674-1679. https://www.aensiweb.com/old/aeb/2011/1674-1679.pdf

Farfán-Vázquez, E. de G., Jasso-Mata, J., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Ramírez-Herrera, C. (2002). Parámetros genéticos y eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *25*(3), 239-246. https://doi.org/10.35196/rfm.2002.3.239

George-Miranda, S., Guillén, S., Viveros-Viveros, H., Montero-Nava, R., & Martínez y Pérez, J. L. (2022). Low germination rate of *Pinus hartwegii* seeds from trees growing at high elevations: Vulnerability to climate change? *Forest Ecology and Management*, *507*, Article 120001. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.120001

Ghildiyal, S. K., Sharma, C. M., & Gairola, S. (2009). Environmental variation in seed and seedling characteristics of *Pinus roxburghii* Sarg. from Uttarakhand, India. *Applied Ecology and Environmental Research*, *7*(2), 121-129. https://doi.org/10.15666/aeer/0702_121129

Hamann, A., Koshy, M. P., Namkoong, G., & Ying, C. C. (2000). Genotype×environment interactions in *Alnus rubra*: developing seed zones and seed-transfer guidelines with spatial statistics and GIS. *Forest Ecology and Management*, *136*(1-3), 107-119. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00284-4

Hermesh, R., & Acharya, S. N. (1992). Influence of maternal plant environment and provenance on alpine bluegrass seed germination. *Canadian Journal of Plant Science*, *72*(3), 801-808. https://doi.org/10.4141/cjps92-096

Hojjat, S. (2011). Effects of seed size on germination and seedling growth of some Lentil genotypes (*Lens culinaris* Medik.). *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, *3*(1), 1-5. https://www.researchgate.net/publication/330159194_Effects_of_seed_size_on_germination_and_seedling_growth_of_some_Lentil_genotypes_Lens_culinaris_Medik

International Seed Testing Association. (2024). International Rules for Seed Testing. In International Seed Testing Association (Ed.), *International Rules for Seed Testing* (Chapter 2, i–2-44 (52)). International Seed Testing Association. https://www.seedtest.org/api/rm/9356SQF24TUK454/ista-rules-2024-02-sampling-final.pdf

Juárez-Agis, A., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., & Sáenz-Romero, C. (2006). Variación geográfica en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Pseudotsuga menziesii* de México. *Agrociencia*, *40*(6), 783-792. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/509

Larson, J. E., Anacker, B. L., Wanous, S., & Funk, J. L. (2020). Ecological strategies begin at germination: Traits, plasticity and survival in the first 4 days of plant life. *Functional Ecology*, *34*(5), 968-979. https://doi.org/10.1111/1365-2435.13543

Leger, E. A., Atwater, D. Z., & James, J. J. (2019). Seed and seedling traits have strong impacts on establishment of a perennial bunchgrass in invaded semi-arid systems. *Journal of Applied Ecology*, *56*(6), 1343-1354. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13367

Liu, L., Hu, J., Chen, X., Xu, X., Yang, Y., & Ni, J. (2022). Adaptation strategy of karst forests: Evidence from the community-weighted mean of plant functional traits. *Ecology and Evolution*, *12*(3), Article e8680. https://doi.org/10.1002/ece3.8680

Loha, A., Tigabu, M., Teketay, D., Lundkvist, K., & Fries, A. (2006). Provenance variation in seed morphometric traits, germination, and seedling growth of *Cordia africana* Lam. *New Forest*, *32*, 71-86. https://doi.org/10.1007/s11056-005-3872-2

Metz, J., Freundt, H., & Jeltsch, F. (2018). Stable germination behavior but partly changing seed-seed interactions along a steep rainfall gradient. *Basic and Applied Ecology*, *28*, 5-16. https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.01.004

Morales-González, E., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., Ramírez-Herrera, C., & Gil-Muñoz, A. (2013). Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *36*(2), 155-162. https://doi.org/10.35196/rfm.2013.2.155

Pérez-Luna, A., Prieto-Ruíz, J. Á., López-Upton, J., Madrid-Aispuro, R. E., & Salcido-Ruíz, S. (2024). Ensayos de germinación y producción de planta de procedencias-progenies de *Pinus patula*. *Bosque*, *45*(2), 257-269. http://dx.doi.org/10.4067/s0717-92002024000200257

Ranade, S. S., & García-Gil, M. R. (2021). Molecular signatures of local adaptation to light in Norway spruce. *Planta*, *253*, Article 53. https://doi.org/10.1007/s00425-020-03517-9

Rawat, K., & Bakshi, M. (2011). Provenance variation in cone, seed and seedling characteristics in natural populations of *Pinus wallichiana* A. B. Jacks (Blue Pine) in India. *Annals of Forest Research*, *54*(1), 39-55. https://doi.org/10.15287/afr.2011.96

Rehfeldt, G. E. (1993). Genetic variation in the Ponderosae of the Southwest. *American Journal of Botany*, *80*(3), 330-343. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1993.tb13807.x

Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Editorial Limusa, S. A.

Sáenz-Romero, C. (2004). Zonificación estatal y altitudinal para la colecta y movimiento de semillas de coníferas en México. En J. J. Vargas-Hernández, B. Bermejo-Velázquez & F. T. Ledig (Eds.), *Manejo de recursos genéticos forestales* (2da edición, pp. 65-77). Colegio de Postgraduados y Comisión Nacional Forestal. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/40552297/Manejo_de_Recursos_geneticos_Forestales-libre.pdf?1449003820=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DManejo_de_Recursos_geneticos_Forestales.pdf&Expires=1782167979&Signature=Nc740dY4zH8uudv6iql1JnYMA3GPGtYMD4so0CwEqPXReU4tYg0wwbMiQHikEvg-1EH~XqO1ceWVVHdStRPl9IhcM6q2TNSioH3n2pr-uHc5Qm35v6xlVeUiWNS0VNNHSWBphj41j6vrRKRrkPJIg9c~64kaTXOcnOUuTovh7GpyN13nObX4rdOF51QaH6WcdeRtAodsjJd-8MPelhjlxJ6veO3gGbYkeodz-y7UFS554dNd8iC~w~V2Dhdk1FWOKNK1G6fA21DxSXTMxlwCh3xhunQefQWmB2z0p

29fPktd1ftZQv2pq-dbJQtZYovPaMmOy2~EaLhZ9K84~GEt8A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA#page=66

Salaya-Domínguez, J. M., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, *46*(*5*), 519-534. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/973

SAS Institute Inc. (2012). *Installation and Maintenance instructions for SAS® 9.2 installation kit for z/OS® Cartridges*. SAS Institute Inc. https://support.sas.com/documentation/installcenter/en/ikinstallcartii/63179/PDF/default/install_cart.pdf

Sasaki, S., & Kozlowski, T. T. (1970). Effects of cotyledon and hypocotyls photosynthesis on growth of young pine seedlings. *New Phytologist*, *69*(2), 493-500. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1970.tb02445.x

Seiffert, S., Weber, S., Sack, U., & Keller, T. (2024). Use of logit transformation within statistical analyses of experimental results obtained as proportions: example of method validation experiments and EQA in flow cytometry. *Frontiers in Molecular Biosciences*, *11*, Article 1335174. https://doi.org/10.3389/fmolb.2024.1335174

Singh, O., & Thapliyal, M. (2012). Variation in cone and seed characters in blue pine (*Pinus wallichiana*) across natural distribution in western Himalayas. *Journal of Forestry Research*, *23*, 235-239. https://doi.org/10.1007/s11676-012-0246-4

Singh, O., Bordoloi, S., & Mahanta, N. (2015). Variability in cone, seed and seedling characteristics of *Pinus kesiya* Royle ex. Gordon. *Journal of Forestry Research*, *26*, 331-337. https://doi.org/10.1007/s11676-015-0036-x

Ulusan, M. D., & Bilir, N. (2008). Broad-sense heritability for seedling characters and its importance for breeding in Scots pine. *Süleyman Demirel University Faculty of Arts and Science Journal of Science*, *3*(2), 133-138. https://dergipark.org.tr/en/pub/sdufeffd/article/134649

Vargas-Hernández, J. J., & Adams, W. T. (1992). Age-age correlation and early selection for wood density in young coastal Douglas-fir. *Forest Science*, *38*(2), 467-478. https://doi.org/10.1093/forestscience/38.2.467

Vela, G. L. (1980). *Contribución a la ecología de Pinus patula Schl. et Cham*. [Publicación especial Núm. 19]. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales.

Velasco-García, M. V., & Hernández-Hernández, A. (2024). Altitudinal genetic variation of *Pinus oocarpa* seedling emergence in the Southern Mountains, Oaxaca, México. *Seeds*, *3*(1), 1-15. https://doi.org/10.3390/seeds3010001

Wahid, N., & Bounoua, L. (2013). The relationship between seed weight, germination and biochemical reserves of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Morocco. *New Forests*, *44*, 385-397. https://doi.org/10.1007/s11056-012-9348-2

Welles, S. R., & Funk, J. L. (2021). Patterns of intraspecific trait variation along an aridity gradient suggest both drought escape and drought tolerance strategies in an invasive herb. *Annals of Botany*, *127*(4), 461-471. https://doi.org/10.1093/aob/mcaa173

Zhang, H., Zhou, D., Matthew, C., Wang, P., & Zheng, W. (2008). Photosynthetic contribution of cotyledons to early seedling development in *Cynoglossum divaricatum* and *Amaranthus retroflexus*. *New Zealand Journal of Botany*, *46*(1), 39-48. https://doi.org/10.1080/00288250809509752

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