Revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 17 (95)
Mayo - Junio (2026)

DOI: 10.29298/rmcf.v17i95.1606
Artículo de investigación

Dinámica de regeneración de *Pinus culminicola* Andresen & Beaman var. *culminicola* en un gradiente altitudinal del Cerro El Potosí

Regeneration dynamics of *Pinus culminicola* Andresen & Beaman var. *culminicola* along an altitudinal gradient of *Cerro El Potosí*

Aldo Tovar-Cárdenas[1], Homero Alejandro Gárate-Escamilla[1]*, Luis Gerardo Cuellar-Rodríguez[1], José Israel Yerena-Yamallel[1], María Inés Yáñez Díaz[1]

Fecha de recepción/Reception date: 3 de octubre de 2025.
Fecha de aceptación/Acceptance date: 24 de marzo de 2026.

[1]Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales, México.

*Autor para correspondencia; correo-e: hgaratesc@uanl.edu.mx
*Corresponding author; e-mail: hgaratesc@uanl.edu.mx

Resumen

Las poblaciones de *Pinus culminicola* del cerro El Potosí, Nuevo León, México, han sido reducidas drásticamente por incendios, deforestación y fragmentación, por lo que apenas permanecen 30 ha aisladas y con una baja densidad poblacional. Este trabajo evalúa cómo las propiedades del suelo afectan la regeneración de dicha especie en el lugar. El estudio se realizó en un bosque templado a tres altitudes (3 300, 3 500 y 3 700 msnm). Se evaluó la regeneración natural de *P. culminicola* y las propiedades físicas y químicas del suelo. Los datos se analizaron mediante ANOVA y *Tukey*, pruebas no paramétricas (*Kruskal-Wallis*, *Mann-Whitney*) y correlaciones de *Pearson*. Los resultados mostraron que los individuos adultos registraron mayores diámetros y áreas de copa a 3 700 msnm, mientras que las plántulas predominaron a 3 300 msnm. La densidad de árboles adultos disminuyó con la altitud, en contraste con la de plántulas. El *pH* fue más alto a 3 500 msnm, la conductividad eléctrica a 3 700 msnm y tanto el carbono, como la materia orgánica aumentaron gradualmente. Además, la regeneración presentó correlaciones positivas con materia orgánica, carbono y fracciones texturales. Se concluyó que solo el *pH* varió con la altitud. El crecimiento de plántulas disminuyó al aumentar la altitud, y en adultos aumentó. La regeneración se asoció positivamente con el carbono orgánico, factor clave para su éxito.

Palabras clave: Bosque templado, características físicas y químicas, correlación, dasometría, plántulas, suelo.

Abstract

The *Pinus culminicola* populations of *Cerro El Potosí*, *Nuevo León* state, Mexico, have been drastically reduced by fires, deforestation, and fragmentation, leaving only 30 ha isolated and with a low population density. This study evaluates how soil properties affect the regeneration of *P. culminicola* in *Cerro El Potosí*. The study was conducted in the temperate forest, at three altitudes (3 300, 3 500, and 3 700 masl). The natural regeneration of *P. culminicola* and the physical-chemical properties of the soil were evaluated. The data were analyzed using ANOVA and Tukey, nonparametric tests (Kruskal-Wallis, Mann-Whitney), and Pearson correlations. The results showed that adult individuals had larger diameters and crown areas at 3 700 masl, while seedlings predominated at 3 300 masl. The density of adult trees decreased with altitude, in contrast to that of seedlings. The pH was higher at 3 500 masl, electrical conductivity at 3 700 masl, and both carbon and organic matter increased gradually. In addition, regeneration showed positive correlations with organic matter, carbon, and textural fractions. It was concluded that only *pH* varied with altitude. Seedling growth decreased with increasing altitude, while adult growth increased. Regeneration was positively associated with organic carbon, a key factor for its success.

Keywords: Temperate forest, physical and chemical characteristics, correlation, mensuration parameters, seedlings, soil.

Introducción

México concentra la mayor riqueza de especies de coníferas, ya que alberga cuatro de las seis familias reconocidas a nivel mundial, y en las sierras Madre Oriental y Occidental se reúne la mayor diversidad del género *Pinus*, con cerca de 49 taxa (Gernandt & Pérez-de la Rosa, 2014). Los ecosistemas templados mantienen un gran número de especies endémicas, altamente susceptibles al disturbio (Galicia et al., 2018). La deforestación y el cambio de uso del suelo provocan su degradación, lo que constituye un problema de alcance global (Hu et al., 2021). Los bosques poseen capacidad de regeneración natural, proceso esencial para su preservación y dinámica sucesional (Ribeiro et al., 2022).

La regeneración del bosque está condicionada por la exposición, la humedad (Flores-Rodríguez et al., 2022), la altitud (Tovar-Cárdenas et al., 2024), el clima y las propiedades edáficas (Norden, 2014), entre otros factores. Por ello, resulta fundamental monitorear el crecimiento y la regeneración, dado que esta última es

clave para garantizar la continuidad de las especies y la estabilidad de las comunidades vegetales (Patiño-Flores et al., 2022).

En este contexto, la vegetación promueve la actividad microbiana y favorece las relaciones tróficas que enriquecen la dinámica del suelo y su calidad. Por lo tanto, el análisis de las propiedades del suelo, como la capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica, calcio, nitrógeno, pH, así como las proporciones de arena y arcilla, es crucial para la determinación de su calidad (García-Gallegos et al., 2023). Se reconoce que las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos cambian según la altitud (Kamal et al., 2023). En consecuencia, la regeneración natural de las especies podría relacionarse con las propiedades del suelo e influir en la germinación y establecimiento de las plántulas.

Ese es el caso del Cerro El Potosí, un Área Natural Protegida (ANP) que alberga una alta riqueza de especies de coníferas, entre las cuales destaca *Pinus culminicola* Andresen & Beaman var. *culminicola*, endémica y catalogada como en peligro de extinción en la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat], 2010). No obstante, el área de distribución de *P. culminicola* ha sido afectada por disturbios de origen antrópico y natural como incendios, deforestación, fragmentación del hábitat, ganadería y cambio de uso de suelo; lo que ha reducido su área de distribución a 30 ha aproximadamente y provocado la pérdida cercana a 40 % de sus poblaciones, y por ello, actualmente, se mantienen en condiciones de aislamiento (Estrada-Castillón et al., 2014). Además, en la actualidad, se ha registrado una baja densidad poblacional, en su mayoría de individuos maduros (Tovar-Cárdenas et al., 2024).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio consistió en analizar el efecto de las propiedades físicas y químicas del suelo sobre la regeneración natural de *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente de altitud con exposición este en el Cerro El Potosí en Galeana, Nuevo León, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en el bosque templado del ANP Cerro El Potosí en el estado de Nuevo León, México, que forma parte del sistema montañoso de la Sierra Madre Oriental (Figura 1). El intervalo altitudinal varía entre 2 000 y 3 721 m (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [INEGI], 1986). Los climas de la cima corresponden a frio y frio extremoso (García-Arévalo & González-Elizondo, 1991); la temperatura media oscila entre 7 y 14 °C, con mínimas que alcanzan los -3 °C (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2016). El suelo es tipo Litosol o Protorendzina, con poca profundidad (1-5 cm) y está compuesto de roca caliza, con alto contenido de materia orgánica y pH alcalino ligero (7.5) (Rzedowski, 2006).

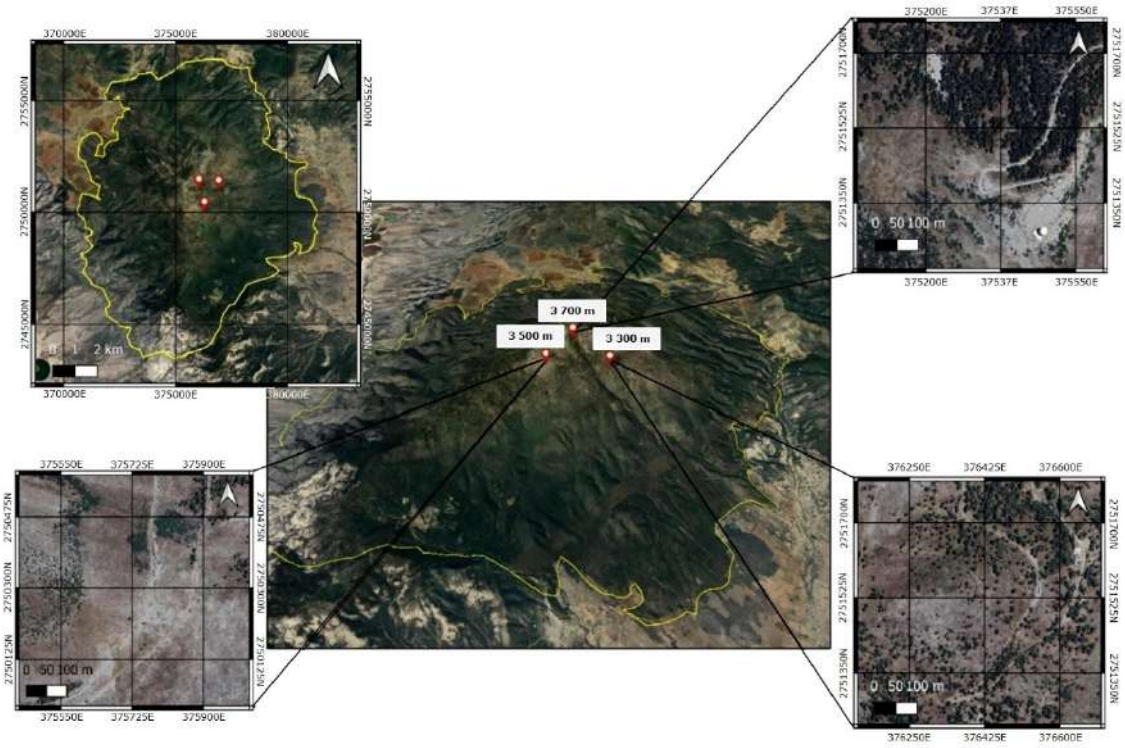


Figura 1. Área de estudio y sitios de muestreo en el ANP Cerro El Potosí, Nuevo León, México.

Sitios de muestreo

La selección de los sitios de muestreo en el Cerro El Potosí se efectuó con base en los datos obtenidos por Tovar-Cárdenas et al. (2024). Se definieron tres niveles de altitud (3 300, 3 500 y 3 700 m), en cada uno se establecieron cuatro sitios circulares de 400 m^2 en los cuales se evaluó la regeneración natural de *P. culminicola* y las propiedades físicas y químicas del suelo (Figura 1). Para el análisis de la regeneración, se registró el diámetro de los individuos de *P. culminicola* (cinta diamétrica *Lufkin*® W606PM), así como la altura y el área de copa de norte a sur y de este a oeste (flexómetro *Truper*® FCN de 10 m). Únicamente, se consideraron los especímenes con diámetro igual o menor a 7.5 cm, según la metodología establecida

por la Comisión Nacional Forestal (Conafor, 2018). Para categorizar los niveles de regeneración natural, se utilizó la metodología de Chauhan et al. (2008), que los clasifican en tres categorías: bueno, regular y malo. Una buena regeneración fue cuando la densidad de árboles jóvenes era mayor que la de adultos. Si ambas densidades eran iguales o similares, se clasificó como regular, si la densidad de árboles jóvenes resultó menor que la de adultos, se categorizó como mala. También se calculó el Índice de regeneración natural (*IRN*) conforme a la metodología propuesta por Acosta et al. (2006), cuya expresión es la siguiente:

$$RNr = \frac{(ArRN + FrRN + CTrRN)}{3}$$

Donde:

RNr = Regeneración natural relativa

ArRN = Abundancia relativa de la regeneración natural

FrRN = Frecuencia relativa de la regeneración natural

CTrRN = Categoría de tamaño relativa de la regeneración natural

La abundancia relativa se calculó a partir del número de individuos de cada especie en relación con el total de individuos, expresada como porcentaje. La frecuencia relativa se obtuvo con el número de sitios en los que se observó cada especie, respecto al total de sitios muestreados.

Para el análisis físico y químico del suelo, se recolectaron por sitio de muestreo cinco submuestras (0-10 cm de profundidad) con una pala escarramán (*Truper*® T-2000); se mezclaron hasta obtener una muestra compuesta de 1 000 g (Cantú-Silva et al., 2018). Las muestras (n=12) fueron enviadas al Laboratorio de Suelos y Nutrición Forestal de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde se sometieron a un proceso de secado a temperatura ambiente, se

tamizaron con una malla de 0.2 mm y finalmente se acondicionaron para su análisis químico.

Las variables evaluadas fueron: contenido de materia orgánica (*MO*) y carbono orgánico (*CO*), determinados con el método de *Walkley-Black* modificado (Woerner-Petran, 1989). El potencial de hidrogeno (*pH*) y la textura del suelo se obtuvieron conforme a la NOM-021-RECNAT-2000 (Semarnat, 2002), mediante el método AS-23 y el procedimiento AS-09 (método hidrométrico de *Bouyoucos*), respectivamente. La conductividad eléctrica (*CE*) se determinó mediante el método rápido en una suspensión suelo-agua en proporción 1:5 (Woerner-Petran, 1989). El *pH* y *CE* se estimaron con un medidor combinado de *pH* y conductividad *Corning*® 542. La densidad aparente (*DA*) se calculó por el método del cilindro (Woerner-Petran, 1989).

Análisis de la información

Se aplicó la prueba de homogeneidad de varianzas de *Levene* y *Shapiro-Wilk* para comprobar normalidad de datos en todas las variables. Para los datos que cumplieron con los supuestos de normalidad y homogeneidad (*pH*, conductividad eléctrica, densidad aparente, carbono orgánico, materia orgánica, textura: arena, limo y arcilla) se utilizó análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de *Tukey* ($p<0.05$). Para aquellas variables que no cumplieron con los supuestos mencionados (diámetro de fuste, altura y área de copa), se usaron las pruebas de comparación de *Kruskal-Wallis* y *Mann-Whitney*. Finalmente, se determinaron las correlaciones de *Pearson* entre las variables de suelo y la regeneración de *P. culminicola* var. *culminicola* en cada nivel de altitud. Los análisis se realizaron con el programa estadístico *Past4* versión 4.7 (Hammer et al., 2001).

Resultados

Parámetros dasométricos

A 3 700 msnm, los árboles adultos presentaron más área de copa y diámetro, mientras que la mayor altura del arbolado se registró a 3 500 msnm, pero sin diferencias estadísticas ($p<0.05$). En las plántulas, el área de copa, la altura y diámetro fueron superiores a 3 300 msnm ($p<0.01$) (Cuadro 1).

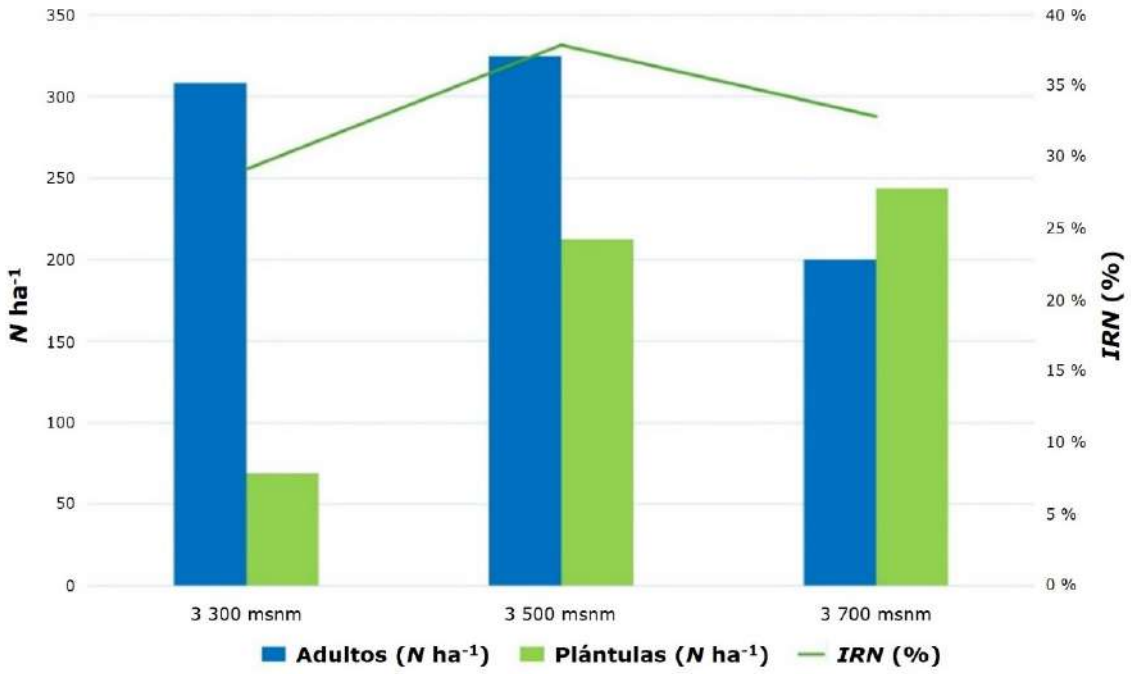
Cuadro 1. Valores promedio de los parámetros dasométricos de árboles adultos y plántulas por nivel de altitud.

Altitud	Etapa de desarrollo	Parámetros dasométricos		
		Área copa (cm^2)	Altura (cm)	Diámetro (cm)
3 300	Adultos	62 642.88 a	145.97 a	8.72 b
	Plántulas	1 418.47 e	29.9 e	1.68 e
3 500	Adultos	91 044.16 a	178.2 a	11.1 ab
	Plántulas	673.69 e	23.69 e	1.3 e
3 700	Adultos	103 976.88 a	155.34 a	13.33 a
	Plántulas	37.51 d	8.76 d	0.39 d

Letras iguales indican similitud entre medias (adultos: a, b y c; plántulas: d y e). Letras diferentes únicamente señala ausencia de similitud y no debe interpretarse como evidencia de diferencias significativas.

Densidad de regeneración natural

A 3 300 msnm se registró la mayor densidad de individuos adultos y la menor de plántulas, con un *IRN* de 29 %, clasificado como regeneración baja. A 3 500 msnm, la densidad de adultos disminuyó y la de plántulas aumentó, y se alcanzó el *IRN* más alto (37 %), también considerado bajo. A 3 700 msnm se observó la menor densidad de adultos y la mayor de plántulas, con un *IRN* de 32 %, correspondiente a regeneración regular (Figura 2).



IRN = Índice de regeneración natural.

Figura 2. Densidad de árboles adultos y plántulas de *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente de altitud en el ANP cerro El Potosí, Nuevo León, México.

Análisis fisicoquímico del suelo

El *pH* fue mayor a 3 500 msnm, con diferencias significativas respecto a los otros niveles ($p<0.05$). La *CE* presentó una tendencia ascendente con la altitud, sin diferencias significativas entre niveles. La *DA* fue mayor a los 3 500 msnm y menor a 3 700 msnm ($p>0.05$). El *CO* y la *MO* se incrementaron con la altitud.

En cuanto a la textura del suelo, se observó una transición de suelos francos (3 300 msnm) a suelos franco-limosos en las altitudes superiores a 3 500 y 3 700 msnm. El contenido de limo aumentó ligeramente con la altitud, mientras que el de arcilla disminuyó. El porcentaje de arena tuvo poca variación (31.79 y 33.56 %) (Figura 3).

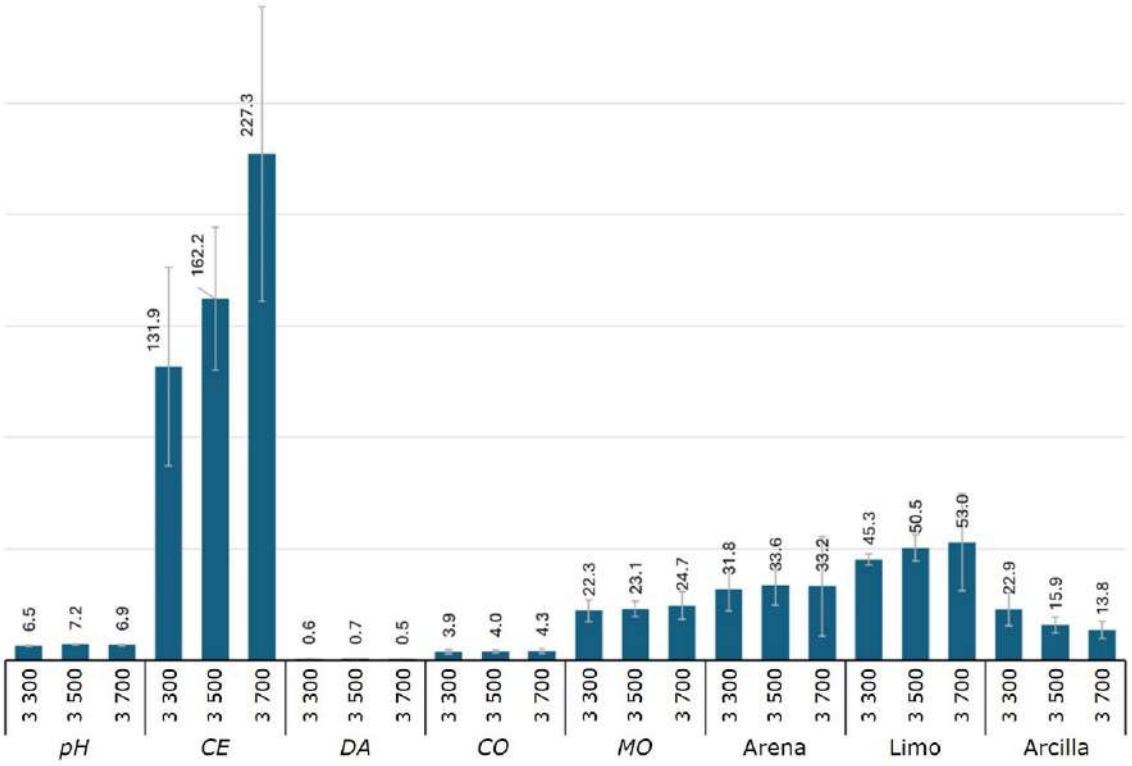


Figura 3. Valores medios de parámetros de suelo en el gradiente altitudinal.

Análisis de correlación

Se estimaron valores de correlación significativos entre la regeneración y el porcentaje de arena (r=0.61) a una altitud de 3 300 msnm, así como entre la *CE* con respecto a la arena (r=1), el *CO* y la *MO* (r=0.76). Se observaron correlaciones positivas (r=1) entre el *CO* y la *MO*, y entre ambas con el contenido de arena. A 3 500 msnm; la regeneración (r=0.81) y la *CE* (r=0.87) mostraron correlaciones positivas significativas con respecto al *CO* y la *MO*. Igualmente, se detectaron asociaciones positivas entre el *pH* y el porcentaje de arena (r=0.72). Por último, a 3 700 msnm, se obtuvo correlación positiva entre la regeneración (r=0.82) y la *CE* (r=0.8) con respecto al *CO* y la *MO*, así como alta correlación entre la *DA* y el porcentaje de limo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Análisis de correlación de *Pearson* para los parámetros del suelo.

	Reg.	***pH***	***CE***	***DA***	***CO***	***MO***	**Arena**	**Limo**	**Arcilla**
3 300 msnm									
Reg.		0.2	0.55	0.22	0.01	0.01	0.61	-0.18	-0.72
pH	0.49		0.76	0.35	0.45	0.45	0.72	-0.61	-0.71
CE	0.42	0.31		-0.13	0.76	0.76	1.00	-0.89	-0.97
DA	-0.98	-0.65	-0.51		-0.68	-0.68	-0.14	0.51	0.01
CO	0.81	0.54	0.87	-0.87		1	0.74	-0.97	-0.61
MO	0.81	0.54	0.87	-0.87	1		0.74	-0.97	-0.61
Arena	0.48	1	0.3	-0.64	0.53	0.53		-0.87	-0.99
Limo	-0.3	-0.95	-0.01	0.45	-0.25	-0.25	-0.95		0.77
Arcilla	-0.66	-0.88	-0.7	0.81	-0.86	-0.86	-0.88	0.69	
3 500 msnm									
3 700 msnm									
Reg.		-0.96	0.32	0.24	0.82	0.82	-0.12	0.21	-0.47
pH	-		-0.25	0.05	-0.76	-0.76	-0.17	0.09	0.47
CE	-	-		0.16	0.8	0.8	0.01	0.16	-0.95
DA	-	-	-		0.22	0.22	-0.98	1	0.04
CO	-	-	-	-		1	-0.04	0.19	-0.88
MO	-	-	-	-	-		-0.04	0.19	-0.88
Arena	-	-	-	-	-	-		-0.98	-0.22
Limo	-	-	-	-	-	-	-		0.05
Arcilla	-	-	-	-	-	-	-	-	

Reg. = Regeneración; *pH* = Potencial de hidrogeno; *CE* = Conductividad eléctrica; *DA* = Densidad aparente; *CO* = Carbono orgánico; *MO* = Materia orgánica.

Discusión

Parámetros dasométricos

El área de copa de los árboles adultos fue mayor a los 3 700 msnm, mientras que las plántulas mostraron más desarrollo en altitudes bajas, lo que podría reflejar respuestas estructurales asociadas al gradiente altitudinal que limitarían el tamaño diamétrico del fuste (Yu et al., 2011). Los árboles adultos alcanzaron su mayor altura a los 3 500 msnm, y las plántulas fueron más altas a los 3 300 y 3 500 msnm. Este patrón sugiere que el crecimiento vertical estaría relacionado con variaciones ambientales como la temperatura, propias de la altitud (Fortin et al., 2019).

El mayor diámetro registrado en los árboles adultos a los 3 700 msnm y su disminución en altitudes inferiores apunta a que el desarrollo diamétrico podría estar influido por la variación ambiental a lo largo del gradiente altitudinal. En contraste, las plántulas desarrollaron diámetros más grandes a los 3 300 msnm, ello sugiere que durante las etapas iniciales el crecimiento diamétrico responde con mayor sensibilidad a la heterogeneidad ambiental del sitio. Resultados similares se han registrados en otras especies forestales, en las que las variaciones ambientales modulan el crecimiento radial (Keleş, 2020).

Densidad de regeneración natural

La regeneración natural presentó un patrón inverso entre adultos y plántulas en el gradiente altitudinal: menor densidad de plántulas en altitud baja, mayor *IRN* y densidad de adultos a 3 500 msnm; así como una mayor abundancia de plántulas y baja presencia de árboles adultos a 3 700 msnm. Estos resultados coinciden con otros ecosistemas montañosos, donde la densidad de plántulas aumenta en cotas altitudinales medias-altas; no obstante, la regeneración varía según la especie, clase de edad, condiciones locales, así como por el disturbio antrópico (Negi et al., 2024). El ramoneo en etapas tempranas también es un factor clave que limita el reclutamiento de juveniles (Negi et al., 2018).

Kemp et al. (2019) señalan que la regeneración de *Pinus ponderosa* Douglas *ex* C. Lawson depende, principalmente, de la temperatura; similar a lo descrito por Stevens-Rumann et al. (2018), quienes destacan el papel determinante del clima en el éxito regenerativo, sin hacer referencia a una especie en particular.

En el caso de *P. culminicola*, la regeneración podría estar influenciada por variaciones térmicas asociadas al gradiente altitudinal, además de otros factores como el régimen de perturbación (incendios, ganadería y fragmentación), la producción y dispersión de semillas, el historial climático del sitio y los procesos reproductivos. En poblaciones pequeñas y aisladas, la autopolinización puede incrementarse, lo que reduce la variabilidad genética y el vigor de las plántulas. En concordancia con Gutiérrez y Trejo (2022), las perturbaciones suelen disminuir la regeneración en coníferas; por lo tanto, la baja regeneración observada en la especie analizada probablemente sea resultado de la interacción entre factores ambientales, antrópicos y reproductivos.

Análisis físico y químico del suelo

El *pH* más alto se registró a 3 500 msnm, lo cual contrasta con los resultados de Mangral et al. (2023), quienes documentaron un descenso del *pH* con la altitud, atribuido a los cambios en la temperatura, la pendiente y la composición de especies vegetales; en gradientes de altitud, esta última incide sobre la acidez del suelo mediante la acumulación de ácidos orgánicos (Egli et al., 2009). Por otro lado, los valores obtenidos (*pH* entre 6.4 y 7.1) podrían deberse a la altitud, ya que los suelos ubicados en elevaciones superiores presentan *pH* más bajo, como consecuencia de la pérdida de bases intercambiables asociada a procesos de erosión y escorrentía del horizonte superficial (Belay et al., 2023).

Aunque la *CE* no presentó diferencias significativas, se observó una tendencia creciente con la altitud, patrón similar al descrito por Mangral et al. (2023) en regiones montañosas. Esta tendencia podría asociarse con procesos vinculados a la acumulación de materia orgánica en altitudes elevadas, los cuales influyen en la dinámica de intercambio iónico del suelo (Bardelli et al., 2017). Asimismo, la variación de *CE* entre altitudes, se asocia con la reducción en el contenido de humedad del suelo (Serrano et al., 2013).

A lo largo del gradiente altitudinal, la *DA* se mantuvo baja (0.52-0.67 g cm^{-3}) y sin diferencias significativas, lo que indica sitios sin compactación del suelo en el Cerro El Potosí. Valores bajos y homogéneos de *DA* son característicos de suelos de montaña con alta porosidad y poco perturbados (Cantú-Silva et al., 2018); por ello, ese parámetro no parece haber actuado como un factor limitante, ni contribuir a las variaciones observadas en las demás propiedades edáficas evaluadas.

Aunque el contenido de *CO* (3.8-4.3 %) y *MO* (22.3-24.7 %) aumentaron con la altitud, la falta de significancia estadística indica escasa variabilidad entre sitios. En gradientes montañosos, las bajas temperaturas y cambios en la productividad de *MO* favorecen la acumulación y estabilización del carbono del suelo (Jasso-Flores et al., 2020), tendencia

que generalmente se incrementa con la altitud y está influenciada por el tipo de bosque y la dinámica de la actividad microbiana del suelo (Massaccesi et al., 2020). Estos resultados se explican por la mayor provisión de carbono en suelos de rodales dominados por coníferas que en aquellos conformados por angiospermas (Devi, 2021).

El cambio textural de franco (3 300 msnm) a franco-limoso (3 500-3 700 msnm) es consistente con procesos de meteorización en zonas montañosas elevadas, donde predominan la fragmentación física y la redistribución de partículas finas (Schoeneberger et al., 2017). Patrón que puede variar según la geología, la pendiente y el uso del suelo. En bosques de *Pinus hartwegii* Lindl. se ha documentado un aumento de arena con la altitud, mientras que el limo y la arcilla no presentan tendencias consistentes (Carrillo-Arizmendi et al., 2025). Dado que la textura regula la humedad y la permeabilidad del suelo, influye en el desarrollo de la vegetación leñosa (Roșca et al., 2019).

Análisis de correlación

A 3 300 msnm, la asociación positiva entre arena y regeneración, podría estar vinculada a una mayor aireación y drenaje del suelo, condiciones que promueven la emergencia de plántulas (Schoeneberger et al., 2017). No obstante, la baja densidad registrada a esa altitud sugiere que la regeneración no depende solo de la textura del suelo, sino que probablemente está determinada por múltiples factores ambientales y antrópicos que condicionan el establecimiento, la supervivencia y el reclutamiento de plántulas.

La alta correlación entre *CE* y arena (r=1) en el nivel de menor altitud, así como entre el *CO* y la *MO* (r=1) en todo el gradiente, coincide con lo citado en bosques de *Pinus hartwegii* en México, donde el contenido de carbono se asocia con la textura del suelo

y por la temperatura media anual (Carrillo-Arizmendi et al., 2025). En el nivel de altitud intermedia (3 500 msnm), la correlación entre regeneración y *CO* (r=0.81) sugiere que la acumulación de *MO* se asocia con condiciones nutricionales más favorables para el establecimiento de plántulas. Asimismo, la correlación entre *pH* y arena (3 300 y 3 500 msnm), respalda lo documentado en ecosistemas europeos, donde la textura del suelo regula la humedad, la permeabilidad y consistencia; factores que inciden directamente en el volumen edáfico y en el crecimiento de la vegetación leñosa (Roșca et al., 2019). A 3 700 msnm, la relación positiva de regeneración y *CE* con el *CO* y la *MO* refuerza el rol de estos parámetros en la dinámica de las especies de árboles de bosques templados. La correlación entre *DA* y limo (r=1) sugiere alta compactación que modifica las condiciones redox y el microhábitat microbiano (Abdullah et al., 2025) y, en exceso, reduce la macroporosidad del suelo, lo que limita el agua y nutrientes disponibles para las raíces y el crecimiento vegetal (Cantú-Silva et al., 2018).

Conclusiones

En el presente estudio se demostr que los parámetros físicos y químicos del suelo (*CE*, *DA*, *CO*, *MO*, arena, limo y arcilla) no variaron significativamente a lo largo del gradiente altitudinal del Cerro El Potosí, excepto el *pH*.

Los parámetros dasométricos de las plántulas disminuyeron con el incremento de la altitud, mientras que en los árboles adultos aumentaron. La regeneración reveló una tendencia positiva con la altitud, con menor densidad de adultos y mayor presencia de plántulas; sin embargo, su estado general se mantuvo entre bajo y regular.

La correlación positiva entre regeneración y carbono orgánico sugiere que la acumulación de materia orgánica favorece condiciones edáficas asociadas al establecimiento de plántulas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), por proporcionar la beca de doctorado de Aldo Tovar-Cárdenas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

Contribución por autor

Aldo Tovar-Cárdenas: desarrollo de manuscrito y análisis estadístico; Homero Alejandro Gárate-Escamilla: interpretación de resultados; Luis Gerardo Cuellar-Rodríguez: análisis de datos; José Israel Yerena-Yamallel y María Inés Yáñez Díaz: revisión de manuscrito.

Referencias

Abdullah, H., Skidmore, A. K., Siegenthaler, A., & Neinavaz, E. (2025). High-resolution prediction of soil pH in European temperate forests using Sentinel-2 and ancillary environmental data. *Scientific Reports*, *15*, Article 28509. https://doi.org/10.1038/s41598-025-03942-4

Acosta, V. H., Araujo, P. A., & Iturre, M. C. (2006). *Caracteres estructurales de las masas*. Universidad Nacional Santiago del Estero. https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-22-Caracteres-estructurales-ACOSTA.pdf

Bardelli, T., Gómez-Brandón, M., Ascher-Jenull, J., Fornasier, F., Arfaioli, P., Francioli, D., Egli, M., Sartori, G., Insam, H., & Pietramellara, G. (2017). Effects of slope exposure on soil physico-chemical and microbiological properties along an altitudinal

climosequence in the Italian Alps. *Science of The Total Environment*, *575*, 1041-1055. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.176

Belay, A. M., Selassie, Y. G., Tsegaye, E. A., Meshesha, D. T., & Addis, H. K. (2023). Soil pH mapping as a function of land use, elevation, and rainfall in the lake tana basin, northwestern of Ethiopia. *Agrosystems, Geosciences & Environment*, *6*(4), Article e20420. https://doi.org/10.1002/agg2.20420

Cantú-Silva, I., Díaz-García, K. E., Yáñez-Díaz, M. I., González-Rodríguez, H., & Martínez-Soto, R. A. (2018). Caracterización fisicoquímica de un Calcisol bajo diferentes sistemas de uso de suelo en el noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *9*(49), 59-86. https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.153

Carrillo-Arizmendi, L., Pérez-Suárez, M., Vargas-Hernández, J. J., Rozenberg, P., & Correa-Díaz, A. (2025). Soil organic carbon stocks along an elevation gradient in mountain forests of *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *16*(90), 87-112. https://doi.org/10.29298/rmcf.v16i90.1553

Chauhan, P. S., Negi, J. D. S., Singh, L., & Manhas, R. K. (2008). Regeneration status of Sal forests of Doon Valley. *Annals of Forestry*, *16*(2), 178-182. https://www.researchgate.net/publication/350447737_Regeneration_Status_of_Sal_Forests_of_Doon_Valley_Annals_of_Forestry_162178-182_2008

Comisión Nacional Forestal. (2018). *Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Informe de Resultados 2009-2014* [Libro blanco]. Comisión Nacional Forestal. https://snmf.cnf.gob.mx/wp-content/uploads/2020/10/Informe-inventario-2009-2014.pdf

Devi, A. S. (2021). Influence of trees and associated variables on soil organic carbon: a review. *Journal of Ecology and Environment*, *45*, Article 5. https://doi.org/10.1186/s41610-021-00180-3

Egli, M., Sartori, G., Mirabella, A., Favilli, F., Giaccai, D., & Delbos, E. (2009). Effect of north and south exposure on organic matter in high Alpine soils. *Geoderma*, *149*(1-2), 124-136. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.11.027

Estrada-Castillón, A. E., Villarreal-Quintanilla, J. Á., Salinas-Rodríguez, M. M., Cantú-Ayala, C. M., González-Rodríguez, H., & Jiménez-Pérez, J. (2014). *Coníferas de Nuevo León, México*. Universidad Autónoma de Nuevo León. https://www.researchgate.net/publication/275276634_Coniferas_de_Nuevo_Leon_Mexico

Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., Mena-Munguía, S., Lomelí-Zavala, M. E., & Cadena-Zamudio, D. A. (2022). Variables ambientales que determinan la regeneración natural de pinos en ecosistemas alterados por incendios. *Ecología Aplicada*, *21*(1), 25-33. https://doi.org/10.21704/rea.v21i1.1872

Fortin, M., Van Couwenberghe, R., Perez, V., & Piedallu, C. (2019). Evidence of climate effects on the height-diameter relationships of tree species. *Annals of Forest Science*, *76*, Article 1. https://doi.org/10.1007/s13595-018-0784-9

Galicia, L., Chávez-Vergara, B. M., Kolb, M., Jasso-Flores, R. I., Rodríguez-Bustos, L. A., Solís, L. E., Guerra-de la Cruz, V., Pérez-Campuzano, E., & Villanueva, A. (2018). Perspectivas del enfoque socioecológico en la conservación, el aprovechamiento y pago de servicios ambientales de los bosques templados de México. *Madera y Bosques*, *24*(2), e2421443. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421443

García-Arévalo, A., & González-Elizondo, S. (1991). Flora y vegetación de la cima del cerro Potosí, Nuevo León, México. *Acta Botánica Mexicana*, (13), 53-74. https://doi.org/10.21829/abm13.1991.608

García-Gallegos, E., Vázquez-Cuecuecha, O. G., Guerra-De la Cruz, V., & Cocoletzi-Pérez, F. J. (2023). Evaluación del efecto de obras de conservación en suelos forestales de Tlaxcala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *14*(78), 34-57. https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i78.1385

Gernandt, D. S., & Pérez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, *85*(Supl. 1), 126-133. https://doi.org/10.7550/rmb.32195

Gutiérrez, E., & Trejo, I. (2022). Tree and shrub recruitment under environmental disturbances in temperate forests in the south of Mexico. *Botanical Studies*, *63*, Article 11. https://doi.org/10.1186/s40529-022-00341-0

Hammer, Ø., Harper, D. A. T., & Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, *4*(1), Article 9. https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/past.pdf

Hu, X., Næss, J. S., Iordan, C. M., Huang, B., Zhao, W., & Cherubini, F. (2021). Recent global land cover dynamics and implications for soil erosion and carbon losses from deforestation. *Anthropocene*, *34*, Article 100291. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2021.100291

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2016). *Sistema de Información Geográfica del Extractor Rápido de Información Climatológica, SIG ERIC versión 1.0.* [Software]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. http://hidrosuperf.imta.mx/sig_eric/

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1986). *Síntesis geográfica del estado de Nuevo León*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825220747/702825220747_1.pdf

Jasso-Flores, I., Galicia, L., Chávez-Vergara, B., Merino, A., Tapia-Torres, Y., & García-Oliva, F. (2020). Soil organic matter dynamics and microbial metabolism along an altitudinal gradient in Highland tropical forests. *Science of the Total Environment*, *741*, Article 140143. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140143

Kamal, A., Mian, I. A., Akbar, W. A., Rahim, H. U., Irfan, M., Ali, S., Alrefael, A. F., & Zaman, W. (2023). Effects of soil depth and altitude on soil texture and soil quality index. *Applied Ecology & Environmental Research*, *21*(5), 4135-4154. http://dx.doi.org/10.15666/aeer/2105_41354154

Keleş, S. Ö. (2020). The effect of altitude on the growth and development of Trojan fir (*Abies nordmanniana* subsp. *equi-trojani* [Asch. & Sint. ex Boiss] Coode & Cullen) saplings. *Cerne*, *26*(3), 381-392. https://doi.org/10.1590/01047760202026032734

Kemp, K. B., Higuera, P. E., Morgan, P., & Abatzoglou, J. T. (2019). Climate will increasingly determine post-fire tree regeneration success in low-elevation forests, Northern Rockies, USA. *Ecosphere*, *10*(1), Article e02568. https://doi.org/10.1002/ecs2.2568

Mangral, Z. A., Islam, S. U., Tariq, L., Kaur, S., Ahmad, R., Malik, A. H., Goel, S., Baishya, R., Barik, S. K., & Dar, T. U. H. (2023). Altitudinal gradient drives significant changes in soil physico-chemical and eco-physiological properties of *Rhododendron*

anthopogon: a case study from Himalaya. *Frontiers in Forests and Global Change*, *6*, Article 1181299. https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1181299

Massaccesi, L., De Feudis, M., Leccese, A., & Agnelli, A. (2020). Altitude and vegetation affect soil organic carbon, basal respiration and microbial biomass in Apennine forest soils. *Forests*, *11*(6), Article 710. https://doi.org/10.3390/f11060710

Negi, V. S., Joshi, B. C., Pathak, R., Rawal, R. S., & Sekar, K. C. (2018). Assessment of fuelwood diversity and consumption patterns in cold desert part of Indian Himalaya: implication for conservation and quality of life. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.237

Negi, V. S., Pandey, A., Singh, A., Bahukhandi, A., Pharswan, D. S., Gaira, K. S., Wani, Z. A., Bhat, J. A., Siddiqui, S., & Yassin, H. M. (2024). Elevation gradients alter vegetation attributes in mountain ecosystems of eastern Himalaya, India. *Frontiers in Forests and Global Change*, *7*, Article 1381488. https://www.researchgate.net/publication/378697569_Elevation_gradients_alter_vegetation_attributes_in_mountain_ecosystems_of_eastern_Himalaya_India

Norden, N. (2014). Del porqué la regeneración natural es tan importante para la coexistencia de especies en los bosques tropicales. *Colombia Forestal*, *17*(2), 247-261. http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a08

Patiño-Flores, A. M., Alanís-Rodríguez, E., Molina-Guerra, V. M., Jurado, E., González-Rodríguez, H., Aguirre-Calderón, O. A., & Collantes-Chávez-Costa, A. (2022). Regeneración natural en un área restaurada del matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, *9*(1), Artículo e2853. https://doi.org/10.19136/era.a9n1.2853

Ribeiro, S., Cerveira, A., Soares, P., & Fonseca, T. (2022). Natural regeneration of maritime pine: A review of the influencing factors and proposals for management. *Forests*, *13*(3), Article 386. https://doi.org/10.3390/f13030386

Roșca, S., Șimonca, V., Bilașco, Ș., Vescan, I., Fodorean, I., & Petrea, D. (2019). The assessment of favourability and spatio-temporal dynamics of *Pinus mugo* in the romanian carpathians using GIS technology and landsat images. *Sustainability*, *11*(13), Article 3678. https://doi.org/10.3390/su11133678

Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México* (1a edición digital). Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. https://drive.google.com/file/d/0B4QXYW6LByLUeDNSaE5jUFBWbmM/view?resourcekey=0-47doiOVtp0RQ13PyUp1PLw

Schoeneberger, P., Wysocki, D., Busskohl, C., & Libohova, Z. (2017). Landscapes, geomorphology, and site description. In Soil Science Division Staff (Ed.), *Soil survey manual* (Agriculture Handbook No. 18, pp. 21-80). United States Department of Agriculture. https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=717582&fecha=31/12/2002#gsc.tab=0

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *NORMA Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres–Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio–Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial de la Federación. https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/435/1/nom_059_semarnat_2010.pdf

Serrano, J. M., Shahidian, S., & Marques da Silva, J. R. (2013). Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. *Precision Agriculture*, *14*, 99-114. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9281-6

Stevens-Rumann, C. S., Kemp, K. B., Higuera, P. E., Harvey, B. J., Rother, M. T., Donato, D. C., Morgan, P., & Veblen, T. T. (2018). Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology Letters*, *21*(2), 243-252. https://doi.org/10.1111/ele.12889

Tovar-Cárdenas, A., Gárate-Escamilla, H. A., Cuellar-Rodríguez, L. G., Pando-Moreno, M., Yerena-Yamallel, J. I., & Jurado-Ybarra, E. (2024). Estado actual de la estructura y composición del bosque de *Pinus culminicola* var. *culminicola* en un gradiente altitudinal en el Cerro El Potosí, Galeana, Nuevo León, México. *Polibotánica*, (58), 65-83. https://doi.org/10.18387/polibotanica.58.5

Woerner-Petran, M. (1989). *Métodos químicos para el análisis de suelos calizos de zonas áridas y semiáridas*. Universidad Autónoma de Nuevo León. https://opactest.db.uanl.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=62086

Yu, D., Wang, Q., Wang, Y., Zhou, W., Ding, H., Fang, X., Jiang, S., & Dai, L. (2011). Climatic effects on radial growth of major tree species on Changbai Mountain. *Annals of Forest Science*, *68*, 921-933. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0098-7

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.