



DOI: 10.29298/rmcf.v16i88.1497

Artículo de Investigación

Aplicación de sustratos alternativos en la producción de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldl. & Cham.

Alternative substrate application on the production of *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldl. & Cham.

Pedro Sinai Rivera Torres¹, Jorge Flores Velázquez^{1*}, Miguel Ángel López López¹, Erickson Basave Villalobos², Abdul Khalil Gardezi¹, Carlos Ramírez Ayala¹

Fecha de recepción/Reception date: 28 de junio de 2024.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de enero de 2025.

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

²Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: jorgelv@colpos.mx

*Corresponding author; e-mail: jorgelv@colpos.mx

Resumen

El incremento en la producción de planta forestal implica mayores demandas de fertilizantes y sustratos comerciales. Una alternativa son las enmiendas orgánicas como mezclas de biosólidos y composta. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de ambos productos como mezcla de sustratos para la producción de *Pinus leiophylla* en vivero. Se diseñó un experimento al azar con cinco repeticiones para probar cuatro mezclas compuestas de biosólidos, composta y suelo agrícola: M1: 70 % suelo agrícola+30 % biosólidos; M2: 70 % suelo agrícola+30 % composta; M3: 50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta; M4: 50 % suelo agrícola+20 % biosólidos+30 % composta, y un Testigo con 100 % suelo agrícola (cinco tratamientos). Se determinaron variables morfológicas, índices de calidad y concentraciones nutrimentales foliares de las plantas para evaluar la respuesta del uso de mezclas de sustratos. Los resultados estadísticos mostraron que la adición de biosólidos mezclados con composta favorece el desarrollo de la planta, al presentar mayores valores en diámetro, altura y el peso seco total (3.69 mm, 9.6 cm y 3.3 g); así como crecimientos relativos en diámetro (0.08 mm mes⁻¹) y altura (0.1 cm mes⁻¹). La mezcla M2 obtuvo los mayores valores de N, P y K en comparación con la M4, lo que implicaría mayor absorción de estos nutrimentos. La planta producida con las enmiendas probadas desarrolló atributos de calidad y aumento en las concentraciones de nutrimentos foliares.

Palabras clave: Biosólidos, composta, concentración nutrimental foliar, especie forestal, *Pinus* L., vivero.

Abstract

The increment in forest plant production implies greater demands for fertilizers and commercial substrates. An alternative is organic amendments such as mixtures of biosolids and compost. The objective of this work was to determine the effect of both products as a substrate mixture for the production of *Pinus leiophylla* in a nursery. A randomized experiment with five replications was designed to test four mixtures composed of biosolids, compost

and agricultural soil: M1: 70 % agricultural soil+30 % biosolids; M2: 70 % agricultural soil+30 % compost; M3: 50 % agricultural soil+30 % biosolids+20 % compost; M4: 50 % agricultural soil+20 % biosolids+30 % compost, and a Control with 100 % agricultural soil (five treatments). Morphological variables, quality indexes and foliar nutrient concentrations of the plants were determined to evaluate the response to the use of substrate mixtures. The statistical results showed that the addition of biosolids and mixed with compost favored plant development by presenting higher values in diameter, height and total dry weight (3.69 mm, 9.6 cm and 3.3 g) as well as relative growth in diameter (0.08 mm month⁻¹) and height (0.1 cm month⁻¹). M2 obtained the highest values of N, P and K compared to M4, which would imply greater absorption of these nutrients. The plant produced with these amendments developed quality attributes and increased foliar nutrient concentrations.

Keywords: Biosolids, compost, foliar nutrient concentration, forest specie, *Pinus L.*, nursery.

Introducción

En las últimas décadas, en México se ha incrementado la producción de planta forestal en viveros, con el objetivo de realizar reforestaciones y acciones de recuperación de zonas degradadas (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2010) y la tendencia sigue en ascenso. Uno de los materiales indispensables para la producción de la planta en vivero es el sustrato, especialmente si se utilizan contenedores rígidos (tubetes). La turba de musgo *Sphagnum L.*, conocido como "peat moss", ha sido uno de los materiales más utilizados como sustrato en los viveros debido a la adaptabilidad que le confieren sus características físicas y químicas (Pane et al., 2011). Sin embargo, su uso ha ocasionado daños ambientales en las turberas debido a los volúmenes de extracción, además de que la demanda de sustratos ha incrementado el costo; No obstante, Caron y Rochefort (2013) indican que la utilización de turba, por ejemplo, no es un problema cuando se emplea en el manejo de humedales (Vandiver et al., 2015).

El uso eficiente de recursos involucrados en la producción de especies forestales en vivero, como los fertilizantes, ha motivado la búsqueda de sustratos alternativos, como son las enmiendas orgánicas a partir de mezclas de biosólidos y compostas. Los biosólidos son subproductos generados por plantas de tratamiento de aguas residuales. En la actualidad, estos residuos se siguen acumulando debido a que no tienen definido

un aprovechamiento posterior, lo que hace necesaria una alternativa de reutilización, pues la mayor parte se deposita a cielo abierto con un impacto ambiental negativo.

Como opción, se ha propuesto utilizar este material como sustrato (mezclado con suelo u otras enmiendas), ya que presenta características físicas y químicas adecuadas para el crecimiento de las plantas en vivero; sin embargo, Wang *et al.* (2021) identificaron que los nutrientes y cationes aportados por los biosólidos pueden acidificar el suelo y modificar el grado de protección mineral de la materia orgánica, lo cual no siempre es conveniente para el desarrollo de especies forestales.

Existen antecedentes del uso de biosólidos como sustrato en la producción de *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil., A. Juss. & Cambess.) Ravenna, cuya aplicación en altas proporciones generó individuos con altura, diámetro y biomasa superiores en comparación con la mezcla de fibra de coco (Alonso *et al.*, 2018). Un resultado similar se registró con plantas de *Pinus sylvestris* L. producidas con mezclas de biosólidos con diatomita en proporción 75:25 y 50:50 (v/v), las cuales resultaron favorables solo para el diámetro; mientras que en sustrato a base de biosólidos al 100 % presentaron mayor altura, diámetro, biomasa aérea y radicular (Kose *et al.*, 2020). Mañas *et al.* (2010) refirieron que los lodos activados mostraron mejores respuestas en el crecimiento de plántulas de *Pinus halepensis* Mill., así como en el contenido de nutrimentos foliares y en la tasa de germinación.

Sin embargo, es conveniente continuar analizando su factibilidad de uso, a pesar de que se ha discutido que la incorporación de biosólidos, especialmente al suelo forestal, y elevadas cantidades de metales pesados pueden ser tóxicos para los microorganismos, y reducir la absorción de nutrimentos esenciales en las plantas, pero en el suelo se incrementa, aunque de forma marginal, la concentración de elementos potencialmente tóxicos para las plantas (Bramryd, 2002, 2013).

En cuanto al uso de compostas, en el ámbito forestal también se han registrado efectos positivos, como lo describen Romero-Arenas *et al.* (2019) al usar composta a base de residuos de la producción del hongo *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler, en la producción de planta de calidad de *Pinus pseudostrobus* Lindl. Además de ser una

fuerza de nutrición, se han observado resultados favorables del uso de té de composta, en forma de biofertilizante, contra agentes patológicos del género *Fusarium* Link (Otero et al., 2020). No obstante, la calidad de las compostas depende en gran medida de los materiales utilizados para su elaboración; por ello, surge la necesidad de investigar diferentes tipos de compostas y su efecto al mezclarlas con otros sustratos orgánicos, debido a que su combinación con biocarbón supera en 4 % el diámetro, en comparación con el uso de solo composta en plantas de *Pinus banksiana* Lamb. (Slesak et al., 2022).

Por otro lado, Simiele et al. (2022) describieron una respuesta contraria, debido a que el uso combinado de biocarbón y composta no mostró ningún efecto positivo sinérgico o acumulativo y provocó una reducción en el crecimiento y desarrollo de plantas de *Populus×euramericana* Guinier en macetas.

Pinus leiophylla Schiede ex Schltdl. & Cham., originario de América del Norte y distribuido naturalmente en México, a lo largo de la Sierra Madre Oriental, Sierra Madre Occidental y Eje Neovolcánico, se le considera una de las coníferas con mayor abundancia en los bosques templados del país (Flores et al., 2023; Ramírez-Orozco et al., 2022). Tiene importancia ecológica significativa, especialmente, en áreas de transición y en zonas de frontera agrícola, donde puede crecer con restricciones de humedad y salinidad en el suelo, además de resistir siniestros, por su elevada capacidad de rebrote posincendio (Barton et al., 2023; Jimenez-Casas & Zwiazek, 2014).

En dicho contexto, el objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de los biosólidos y compostas, como complementos del sustrato, en las características morfológicas y estado nutrimental de *Pinus leiophylla* producido en vivero. La hipótesis que se planteó fue ¿el uso de biosólidos y composta mezclados con suelo agrícola, mejora la morfología y estado nutrimental foliar de las plantas de *P. leiophylla* en vivero?

Materiales y Métodos

Ubicación del experimento

El experimento se llevó a cabo de octubre de 2022 a septiembre de 2023 en el Vivero Forestal Experimental de la División de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), con coordenadas geográficas 19°29'24" N y 98°52'15" O; ubicado a 2 283 msnm. Las semillas de *Pinus leiophylla* utilizadas procedían de un rodal natural localizado en San Felipe, Tlaxcala, México (19°29'05" N y 98°35'40" O; altitud de 2 500 msnm). Se sembraron el 25 de octubre; como almácigos, se trabajó con charolas de germinación con perlita como sustrato. El trasplante se realizó el 9 de noviembre a tubetes de polipropileno *INNOVAPLAST*® con una capacidad de 305 cm³. El sitio experimental estaba cubierto por malla sombra de 70 % de transmisividad lumínica. El clima de la región es templado con temperatura media de 16.4 °C y precipitación media anual de 616.6 mm (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [IMTA], 2013).

Diseño experimental y de tratamientos

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con los siguientes tratamientos:

Tratamiento 1. Testigo (T): 100 % suelo agrícola.

Tratamiento 2. M1: 70 % suelo agrícola+30 % biosólidos.

Tratamiento 3. M2: 70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica.

Tratamiento 4. M3: 50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta.

Tratamiento 5. M4: 50 % suelo agrícola+20 % biosólidos+30 % composta.

Se definieron cinco repeticiones por tratamiento y la unidad experimental consistió en charolas forestales de polipropileno de 25 cavidades, cada una con una capacidad de 305 cm³ por cavidad o tubete.

Descripción de los sustratos

El suelo agrícola fue el sustrato base, debido a que es el principal insumo utilizado dentro del propio vivero forestal. Se cribó con una malla de metal de 6×6 mm de apertura y se aplicó *Vapam* (AMVAC® Chemical Corporation, USA) en una dosis de 0.5 L en 20 L de agua. Presentó una textura franca, pH de 7.64, conductividad eléctrica de 0.6 dS m⁻¹ y 1.03 % de materia orgánica; concentración de 0.2 % de N, 4.2 mg kg⁻¹ de P y 4.02 cmol kg⁻¹. Los biosólidos se obtuvieron de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Atotonilco (PTARA) en Atotonilco de Tula, en el estado de Hidalgo. Cumplen con los parámetros y límites máximos permisibles que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 (NOM-004-SEMARNAT-2002, 2002), que permite su aprovechamiento para uso forestal y mejoramiento de suelo. Registraron un pH de 8.65, conductividad eléctrica de 2.3 dS m⁻¹, materia orgánica 46.3 %, humedad del 68.7 % y una concentración de 4.12 % de N, 2.06 % de P y 0.26 % de K.

La composta se obtuvo a partir de abono de ganado ovino y bovino y de desechos domésticos. Presentó un pH de 9.1, conductividad eléctrica de 6.8 dS m⁻¹, 33.3 % de materia orgánica y humedad de 36.2 %. La aportación nutritiva fue de 1.38 %, 0.74 % y 2.37 % de N, P y K respectivamente.

Variables por evaluar

A los 10 meses de edad de las plantas, se determinó el diámetro al cuello de la raíz (D , mm) con un calibrador vernier digital *Steren*[®] Her-411; la altura total (H , cm) con un flexómetro *Cadena*[®] MGA 5020, graduado en cm y mm. Las plantas se separaron en raíz, tallo y follaje y se metieron en una estufa eléctrica *Shel Lab*[®] 1600 Hafo-Series, a 70 °C por 48 horas para determinar los pesos secos (g) con una báscula digital *Sartorius*[®] PRO32F con un centigramo de precisión; se obtuvo el peso seco de la raíz (PSR , g), el peso seco aéreo (PSA , g) y el peso seco total (PST , g). Con estas variables se determinó la Tasa de Crecimiento Relativo en Diámetro (CRD , mm mes⁻¹) y en Altura (CRH , cm mes⁻¹) con la ecuación 1 (Pallardy, 2008):

$$CR = \frac{\ln(X_2) - \ln(X_1)}{\Delta t} \quad (1)$$

Donde:

CR = Crecimiento relativo

\ln = Logaritmo natural

X_1 = Variable medida en la primera fecha

X_2 = Variable medida en la última fecha

Δt = Tiempo entre ambas mediciones

La primera fecha de medición fue en enero de 2023 y la última en septiembre de 2023. También, se determinaron los indicadores de calidad de planta, como la relación parte aérea-raíz (PAR), dividiendo el PSA y el PSR ; índices como el Índice de Esbeltez

(*IE*) al dividir la *H* entre el *D* (Johnson & Cline, 1991) y el Índice de Calidad de *Dickson* (*ICD*), ecuación 2 (Dickson, 1960):

$$ICD = \frac{PST(g)}{\frac{Altura (cm)}{Diámetro (mm)} + \frac{PSA (g)}{PSR (g)}} \quad (2)$$

Donde:

PST = Peso seco total

PSA = Peso seco aéreo

PSR = Peso seco de la raíz

Análisis nutrimental

Se determinaron las concentraciones foliares de N, P, K, Ca, Mg, Mn, B, Cu, Fe y Zn; a partir de muestras compuestas de follaje de cinco plantas con cuatro repeticiones por tratamiento. El N se determinó mediante el método *Semimicro-Kjeldahl* (Bremner, 1965); el resto de los elementos se analizaron en el extracto resultante de la digestión HNO₃:HCl₄ (2:1, v:v) de tejido vegetal seco y molido, con un espectrofotómetro de emisión atómica (*Agilent*[®] Series ICP-OES 725).

Análisis de datos

El efecto de tratamientos sobre las variables morfológicas, de calidad y nutrimentales se obtuvieron mediante un Análisis de Varianza (ANOVA) en el *software R* versión 4.3.1 (R Core Team, 2022), con una confiabilidad de 95 % ($p < 0.05$). Para identificar diferencias entre las mezclas, se hizo una comparación de medias con la prueba de *Tukey* ($\alpha = 0.05$). El diagnóstico del estado nutrimental se realizó mediante el método gráfico de vectores (Timmer & Stone, 1978) y con la interpretación de los nomogramas (López-López & Alvarado-López, 2010); se consideró como punto de referencia el estado nutrimental del tratamiento Testigo. El modelo estadístico empleado fue el siguiente (ecuación 3):

$$Y_i = \mu + \alpha_i + e_i \quad (3)$$

Donde:

Y_i = Variable respuesta

μ = Media general de los datos

α_i = Diferencia de la media del *i-ésimo* tratamiento

e_i = Error experimental

Resultados y Discusión

Variables morfológicas e índices de calidad

El ANOVA indicó diferencias altamente significativas en todas las variables de estudio ($p=0.0001$); en particular, la mezcla M1 (70 % suelo agrícola+30 % biosólidos), registró los valores más altos de todas las variables morfológicas e índices de calidad, excepto en el peso seco de la raíz y el Índice de Esbeltez (Cuadro 1).

Cuadro 1. Promedio y desviación estándar de las variables morfológicas e índices de calidad de plantas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. en etapa de vivero producidas en diferentes mezclas de sustratos.

Variable	Tratamiento				
	Testigo	M1	M2	M3	M4
<i>D</i> (mm)	3.81±1.00d	7.50±2.90a	2.51±0.60e	6.29±2.50b	5.03±2.00c
<i>H</i> (cm)	9.23±3.00c	18.83±90a	7.45±4.30d	18.53±12.80a	14.51±5.90b
<i>PSR</i> (g)	0.75±0.10d	1.32±0.20b	0.38±0.10e	1.54±0.30a	0.99±0.10c
<i>PSA</i> (g)	0.72±0.10c	3.45±1.00a	0.51±0.10c	3.2±1.10a	1.95±0.40b
<i>PST</i> (g)	1.47±0.30c	4.77±1.80a	0.89±0.20d	4.75±2.20a	2.94±1.00b
<i>CRD</i> (mm mes ⁻¹)	0.20±0.01d	0.28±0.02a	0.16±0.02e	0.25±0.01b	0.23±0.02c
<i>CRH</i> (cm mes ⁻¹)	0.13±0.01c	0.23±0.01a	0.12±0.01c	0.21±0.01a	0.19±0.01b
<i>PAR</i>	0.98±0.04d	2.47±0.6a	1.45±0.30c	2.19±0.30b	2.04±0.10b
<i>IE</i>	2.54±0.40b	2.68±0.90ab	3.1±0.60a	3.08±0.60a	3.06±0.70a
<i>ICD</i>	0.44±0.05c	0.94±0.10a	0.21±0.02d	0.96±0.20a	0.62±0.1b

Testigo = 100 % suelo agrícola; M1 = 70 % suelo agrícola+30 % biosólidos; M2 = 70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica; M3 = 50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta; M4 = 50 % suelo agrícola+20 % biosólidos+30 % composta. *D* = Diámetro (mm); *H* = Altura (cm); *PSR* = Peso seco de la raíz; *PSA* = Peso seco aéreo; *PST* = Peso seco total; *CRD* = Crecimiento relativo en diámetro; *CRH* = Crecimiento relativo en altura; *PAR* = Relación parte área-raíz; *IE* = Índice de Esbeltez; *ICD* = Índice de Calidad de *Dickson*. Letras diferentes dentro de una columna indica diferencias ($p<0.05$) con *Tukey*.

La M1 superó al tratamiento Testigo por 3.69 mm, 9.6 cm y 3.3 g en diámetro, altura y peso seco total, respectivamente. Además, registró mayores valores de crecimiento relativo en diámetro (0.08 mm mes^{-1}) y altura (0.1 cm mes^{-1}). Los resultados anteriores respecto a los de peso seco aéreo indican una mejor condición de salud de las plantas, ya que presentan mayor follaje, lo que se asocia con los procesos fisiológicos y las raíces de las plantas (Moreno *et al.*, 2021).

Respecto al sustrato M2 (70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica) se obtuvieron valores bajos en todas las variables, excepto para el Índice de Esbeltez, cuyos registros fueron inferiores a los del Testigo (1.3 mm en diámetro y 1.78 cm en altura). El valor de *PST* fue de 0.89 g (0.58 g menos que el Testigo) y 3.88 g menos que la mezcla M1.

Los resultados morfológicos sugieren que la incorporación de biosólidos (30 %) como parte del sustrato es favorable para la producción de planta de *Pinus leiophylla*. Las mezclas M1 y M3 que incluyeron la porción de 30 % de biosólidos, superaron los 4 mm en diámetro y 15.25 cm en altura y, de acuerdo con los parámetros de calidad recomendados por la Comisión Nacional Forestal, garantizan una mayor supervivencia de la planta en campo (Conafor, 2010). Por otro lado, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016, un diámetro $\geq 4 \text{ mm}$ es aceptable como indicador de calidad de planta en vivero para *Pinus leiophylla* (NMX-AA-170-SCFI-2016, 2016). Estos datos comparados con el Testigo reflejan que el uso de fuentes de nutrición en vivero favorece de manera directa la morfología de la planta (Grossnickle & MacDonald, 2018; Heras-Marcial *et al.*, 2023). También concuerdan con lo observado por Melo *et al.* (2019), quienes refieren que los biosólidos combinados con sustratos como la corteza de *Bactris gasipaes* Kunth (1:2, 1:3 v:v) propician mayores valores en altura, diámetro y materia seca en plantas de *Schinus terebinthifolius* Raddi de 120 días de edad. El diámetro promedio de todos los tratamientos fue de 5.03 mm, cifra más alta en comparación con otros individuos de *Pinus leiophylla* de un año de edad (3.5 mm) producidos bajo un sistema tecnificado con fertilizantes de liberación controlada (Palacios *et al.*, 2015). El promedio de altura fue de 13.7 cm y el Índice de Calidad de *Dickson* de 0.634, los cuales superan a lo descrito por Buendía *et al.* (2020) al aplicar

fertilización exponencial a ejemplares de *Pinus leiophylla* de seis meses en vivero. De igual manera, en otro experimento con árboles de la misma especie de cuatro meses de edad y tratamientos de fertilización constante y exponencial, los valores de diámetro, altura, *ICD* y peso seco total fueron inferiores (Buendia et al., 2016) con una altura promedio menor (13.71 cm), en comparación con individuos de siete meses producidos en sistema de bolsas de polietileno (28.4 cm) (Pineda et al., 2020).

En cuanto al *ICD*, las mezclas M1, M3 y M4 mostraron valores superiores a 0.5, que indican alta calidad de planta producida de acuerdo a la clasificación de Rueda-Sánchez et al. (2014) y Sáenz et al. (2018). El Índice de Esbeltez (*IE*) es un indicador de la resistencia de la planta a la desecación por el viento, de la supervivencia y del crecimiento potencial en sitios secos, y su valor debe ser menor a 6; en este caso, todos los tratamientos fueron inferiores a 6 (Rueda-Sánchez et al., 2014). Respecto a la relación parte aérea-raíz (*PAR*), de acuerdo con Rueda-Sánchez et al. (2014), la planta producida en las mezclas M1, M3 y M4 son clasificadas como planta de media calidad. El indicador relaciona la parte aérea-parte raíz, de acuerdo con los autores, si la biomasa aérea es mayor a la de raíz, esto se asocia con una escasa precipitación y un desarrollo radicular que no es suficiente para proveer a la parte aérea de la planta (Thompson, 1985).

Concentración nutrimental foliar

El tratamiento M1 registró las mayores concentraciones foliares en Mn y B. El Tratamiento M3 (50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta) supera por 0.35 % de N al Testigo que fue el que presentó menor valor. Al Tratamiento M2 (70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica) correspondieron los números más altos de P

y K, por encima del Testigo por 96.9 mg kg⁻¹ y 2 638.8 mg kg⁻¹, respectivamente. El Testigo exhibió las mayores concentraciones foliares de Ca, Mg, Cu y Zn, mientras que para el Fe no se obtuvieron diferencias significativas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Promedios y desviación estándar de las concentraciones nutrimentales foliares de plantas de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. producidas en vivero en diferentes mezclas de sustratos.

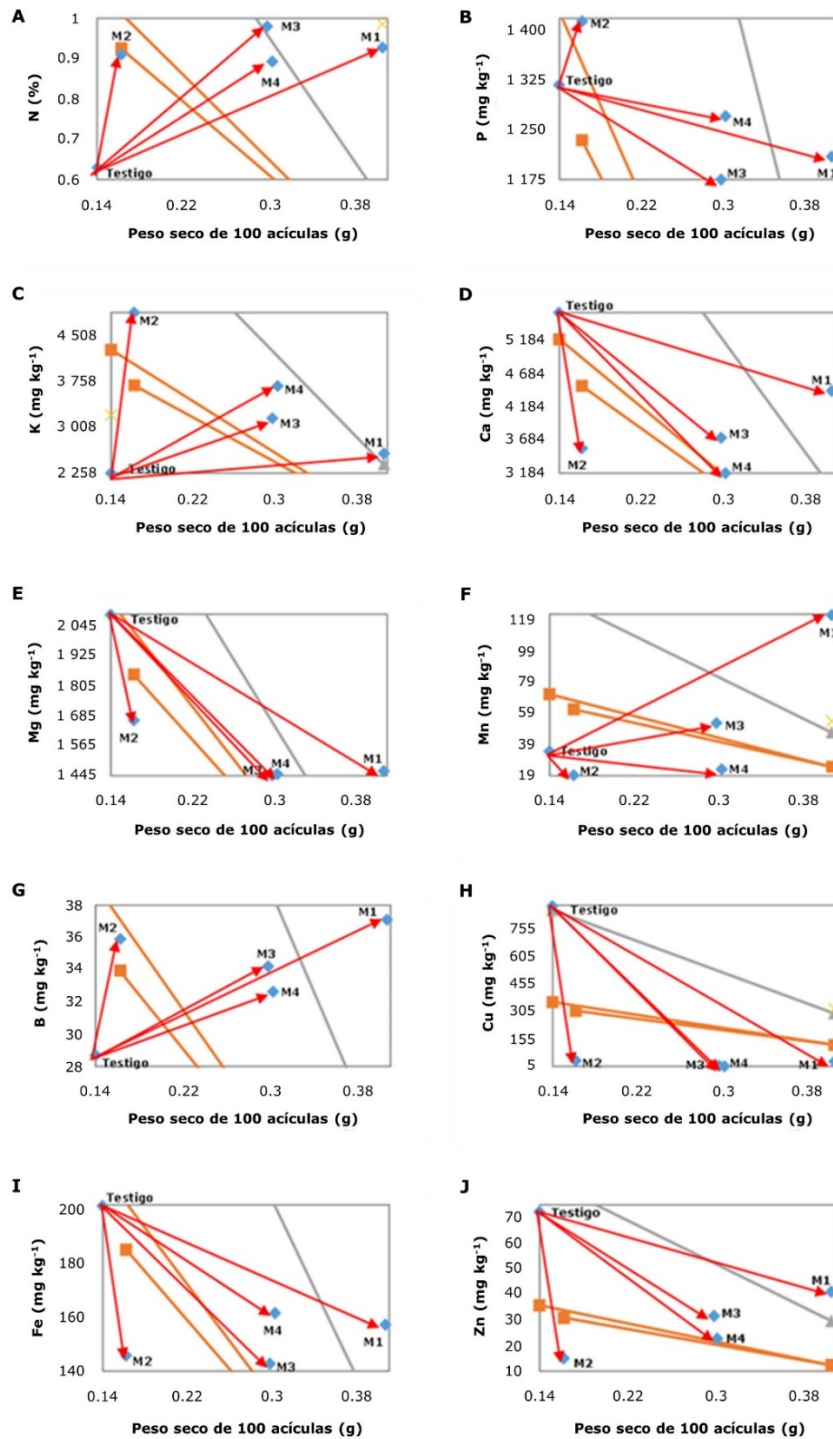
Variable	Tratamiento				
	Testigo	M1	M2	M3	M4
N (%)	0.63 ±0.10b	0.93 ±0.20ab	0.91 ±0.10ab	0.98 ±0.10a	0.89 ±0.20ab
P (mg kg ⁻¹)	1 318.50 ±127.40ab	1 210.10 ±134.60ab	1 415.40 ±65.10a	1 175.10 ±82.60b	1 271.50 ±59.70ab
K (mg kg ⁻¹)	2 258.60 ±157.00b	2 583.10 ±185.00cd	4 897.40 ±144.00a	3 159.50 ±216.00bc	3 692.20 ±412.00b
Ca (mg kg ⁻¹)	5 619.40 ±547.70a	4 432.10 ±218.30b	3 561.80 ±293.80c	3 721.20 ±347.1bc	3 184.20 ±246.00c
Mg (mg kg ⁻¹)	2 092.10 ±26.90a	1 463.40 ±114.70b	1 667.60 ±166.60b	1 445.90 ±77.50b	1 450.90 ±83.50b
Mn (mg kg ⁻¹)	34.60 ±3.20b	122.40 ±29.00a	19.30 ±0.80b	52.80 ±13.00b	23.07 ±2.00b
B (mg kg ⁻¹)	28.71 ±1.90b	37.10 ±4.90a	35.90 ±2.10ab	34.21 ±3.00ab	32.64 ±2.60ab
Cu (mg kg ⁻¹)	880.00 ±585.00a	32.48 ±26.40b	38.09 ±32.50b	9.79 ±2.50b	7.02 ±0.50b
Fe (mg kg ⁻¹)	201.50 ±62.00a	157.37 ±18.60a	145.80 ±23.90a	142.70 ±26.20a	161.60 ±22.30a
Zn (mg kg ⁻¹)	72.20a	41.01ab	15.00b	31.59b	22.69b

Testigo= 100 % suelo agrícola; M1 = 70 % suelo agrícola+30 % biosólidos;

M2 = 70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica; M3 = 50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta; M4 = 50 % suelo agrícola+20 % biosólidos+30 % composta. Letras diferentes dentro de una columna indica

diferencias ($p < 0.05$) con *Tukey*.

Las tendencias se comportan de forma similar en las concentraciones de N (Figura 1A), K (Figura 1C) y B (Figura 1G). Por otro lado, las gráficas de Ca (Figura 1D), Mg (Figura 1E), Cu (Figura 1H), Fe (Figura 1I) y Zn (Figura 1J) reflejan otro grupo de tendencia, lo que fue común en todas las mezclas, pues reflejaron un incremento del peso seco de las acículas. El P (Figura 1B) a excepción de M2, muestra la misma tendencia que el segundo grupo. Esto también se observa para el Mn (Figura 1F), a excepción de la M2, cuya tendencia coincide con la del primer grupo.



Testigo = 100 % suelo agrícola; M1 = 70 % suelo agrícola+30 % biosólidos;
 M2 = 70 % suelo agrícola+30 % composta orgánica; M3 = 50 % suelo agrícola+30 % biosólidos+20 % composta; M4 = 50 % suelo agrícola+20 % biosólidos+30 % composta.

Figura 1. Nomogramas de *Timmer* de las concentraciones nutrimentales foliares de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham. producido en vivero en diferentes mezclas de sustratos.

El tratamiento Testigo resultó deficiente en N, K y B, lo cual se subsanó con los tratamientos con biosólidos (M1), composta (M2) y sus combinaciones (M3 y M4), y explica las respuestas positivas en el peso seco de acículas (Figura 1). La promoción del crecimiento por parte de los biosólidos y las compostas, solo aplicados al suelo o combinados con composta, generó la dilución de P, Ca, Mg, Cu, Fe y Zn en el follaje de las plantas, ello indica que ni los biosólidos, ni la composta fueron suficientes para cubrir los requerimientos de las plantas por estos nutrimentos (López-López & Alvarado-López, 2010). Los resultados son equiparables a los obtenidos por Buendía et al. (2016), quienes señalan el promedio de N (0.87 %), P (1 278 mg kg⁻¹) y K (3 318 mg kg⁻¹) de todos los tratamientos estuvo por debajo del promedio de N (2.65 %), P (2 303 mg kg⁻¹) y K (4 235 mg kg⁻¹) con fertilización química, manteniendo la relación nutrimental de los elementos, y el N es menor en 1.6 %, 879 mg kg⁻¹ en P y en 773.34 mg kg⁻¹ de K.

En comparación con otras especies forestales, las concentraciones foliares de P y K son menores de lo que se consigna para plántulas de 10 meses de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. en vivero, pero no las de N (Vicente-Arbona et al., 2019). Martínez-Nevárez et al. (2023) obtuvieron en un ensayo de fertilización controlada en *Pinus cooperi* C. E. Blanco de un año de edad, mayores valores en N por 0.4 %, en comparación con el tratamiento Testigo y por 0.4 % en la mezcla M3, pero menor valor promedio en P (787 mg kg⁻¹). Aguilera-Rodríguez et al. (2021) en un ensayo con *Pinus patula* Schltdl. & Cham. de siete meses de edad y diferentes tipos de aserrín y fertilizantes químicos, citan mayores valores en N (1.39 %), P (2 055 mg kg⁻¹), K (48 855 mg kg⁻¹) y Mn (287 mg kg⁻¹); mientras que Ca (2 264 mg kg⁻¹), Mg (791 mg kg⁻¹), B (19 mg kg⁻¹), Cu (11 mg kg⁻¹), Fe (68 mg kg⁻¹) y Zn (27 mg kg⁻¹) fueron mayores en este estudio. Lo anterior puede ser un reflejo del propio sustrato y fuente de

nutrición, en este caso los biosólidos, además de la diferencia entre especies. Lo anterior es un indicativo de la importancia de conocer la proporción adecuada de biosólidos para no aumentar la concentración de nutrimentos como el Cu y Zn en las plantas. Sin embargo, de manera general, la adición de biosólidos en solitario con el suelo y mezclada con composta reflejó un aumento en las características morfológicas de las plántulas, que coincide con lo observado en otras especies como *Pinus cembroides* Zucc. (Madrid-Aispuro *et al.*, 2020) después de 14 meses en vivero. Se ha mostrado viabilidad en el uso de composta en vivero como una alternativa de sustrato en especies como *Juniperus polycarpus* K. Koch (Negi *et al.*, 2022) y *Castanea sativa* Mill. (Fuertes-Mendizábal *et al.*, 2021), con proporciones más bajas a las aplicadas en este estudio.

Conclusiones

Las características morfológicas de las plantas de *Pinus leiophylla* producidas en sustratos a base de biosólidos y compostas desarrollan mejor diámetro, altura y biomasa, en comparación con las producidas en suelo agrícola (Testigo). Los índices de calidad de planta y las concentraciones nutrimentales en follaje muestran que el uso de biosólidos para la producción de planta forestal son una buena alternativa, con impactos benéficos en el ahorro de fertilizantes químicos. Los tratamientos ensayados fueron aplicados aun cuando los biosólidos presentaron intervalos de pH por arriba de la recomendación; sin embargo, proporciones equilibradas con suelo y composta son agrónomicamente viables para la producción del género *Pinus*. En perspectiva, se reconoce la aplicación de biosólidos en especies no comestibles, como algodón, flor de corte y otras especies forestales, por lo que se sugiere continuar con el análisis sobre la viabilidad del uso de biosólidos como complemento al suelo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la PTARA Atotonilco por la donación de biosólidos. A Leopoldo Mohedano, José Navarro y al Programa Ambiental Universitario de la UACH. Especial agradecimiento a Jorge Luis Nieves Juárez y Josué Castañeda González por las facilidades y ayuda brindada a lo largo de la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Pedro Sinai Rivera Torres: planeación del estudio, redacción del manuscrito, toma de datos, análisis e interpretación de resultados; Jorge Flores Velázquez: dirección del estudio, redacción del manuscrito; Miguel Ángel López López: planeación del estudio, análisis e interpretación de resultados, redacción del manuscrito; Erickson Basave Villalobos, Abdul Khalil Gardezi y Carlos Ramírez Ayala: asesoría y redacción de manuscrito.

Referencias

Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Trejo-Téllez, L. I., y Ordaz-Chaparro, V. M. (2021). Sustratos con aserrín de coníferas y latifoliadas para producir planta de *Pinus*

- patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Agrociencia*, 55(8), 719-732. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2664>
- Alonso, J. M., Abreu, A. H. M., Melo, L. A., Leles, P. S. S., & Cabreira, G. V. (2018). Biosolids as substrate for the production of *Ceiba speciosa* seedlings. *CERNE*, 24(4), 420-429. <https://doi.org/10.1590/01047760201824042568>
- Barton, A. M., Poulos, H. M., Koch, G. W., Kolb, T. E., & Thode, A. E. (2023). Detecting patterns of post-fire pine regeneration in a Madrean Sky Island with field surveys and remote sensing. *Science of the Total Environment*, 867, Article 161517. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161517>
- Bramryd, T. (2002). Impact of sewage sludge application on the long-term nutrient balance in acid soils of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) forests. *Water, Air, and Soil Pollution*, 140, 381-399. <https://doi.org/10.1023/A:1020142311652>
- Bramryd, T. (2013). Long-term effects of sewage sludge application on the heavy metal concentrations in acid pine (*Pinus sylvestris* L.) forests in a climatic gradient in Sweden. *Forest Ecology and Management*, 289, 434-444. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.045>
- Bremner, J. M. (1965). Total Nitrogen. In A. G. Norman (Ed.), *Methods of soil analysis. Part 2 Chemical and Microbiological Properties* (pp. 1149-1178). American Society of Agronomy. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2885711>
- Buendía V., M. V., López L., M. Á., Cetina A., V. M., & Diakite, L. (2016). Substrates and nutrient addition rates affect morphology and physiology of *Pinus leiophylla* seedlings in the nursery stage. *iForest*, 10(1), 115-120. <https://doi.org/10.3832/ifor1982-009>
- Buendía V., M. V., López L., M. Á., Cetina A., V. M., Díaz R., S. G., y Sánchez V., O. (2020). Producción en vivero y respuesta morfofisiológica en campo de *Pinus leiophylla* Schl. & Cham. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 8(2), 358-374. <https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/595>
- Caron, J., & Rochefort, L. (2013). Use of peat in growing media: state of the art on industrial and scientific efforts envisioning sustainability. *Acta Horticulturae*, 982, 15-22. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.982.1>

- Comisión Nacional Forestal. (2010). *Prácticas de reforestación. Manual Básico*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.conafor.gob.mx/BIBLIOTECA/MANUAL_PRACTICAS_DE_REFORESTACION.PDF
- Dickson, A., Leaf, A. L., & Hosner, J. F. (1960). Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *The Forestry Chronicle*, 36(1), 10-13. <https://doi.org/10.5558/tfc36010-1>
- Flores, A., Buendía R., E., Pineda O., T., Flores A., E., & Méndez-González, J. (2023). Genetic conservation and use of genetic resources of 18 Mexican pine species. *Diversity*, 15(6), 735. <https://doi.org/10.3390/d15060735>
- Fuertes-Mendizábal, T., Huérfano, X., Ortega, U., González-Murua, C., Estavillo, J. M., Salcedo, I., & Duñabeitia, K. M. (2021). Compost and PGP-based biostimulant as alternative to peat and NPK fertilization in chestnut (*Castanea sativa* Mill.) nursery production. *Forests*, 12(7), 850. <https://doi.org/10.3390/f12070850>
- Grossnickle, S. C., & MacDonald, J. E. (2018). Seedling quality: History, application, and plant attributes. *Forests*, 9(5), 283. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Heras-Marcial, M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2023). Influence of fertilization on survival and growth of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under nursery and field conditions. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 3-14. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.019>
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2013). *Estractor Rápido de Información Climatológica-ERIC III y base de datos nacionales [Software]*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Jimenez-Casas, M., & Zwiazek, J. J. (2014). Adventitious sprouting of *Pinus leiophylla* in response to salt stress. *Annals of Forest Science*, 71, 811-819. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0379-z>
- Johnson, J. D., & Cline, M. L. (1991). Seedling quality of Southern pines. In M. L. Duryea & P. M. Dougherty (Eds.), *Forest regeneration manual* (pp. 143-159). Springer Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3800-0_8

- Kose, M., Ugurlu, C., Oncul, O., Demirci, F., & Angin, I. (2020). The use of sewage sludge and diatomite as growing medium in Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) seedling production and evaluation of its land performance. *Sumarski List*, 144(11-12), 559-564. <https://doi.org/10.31298/SL.144.11-12.3>
- López-López, M. Á., y Alvarado-López, J. (2010). Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y Bosques*, 16(1), 99-108. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1611182>
- Madrid-Aispuro, R. E., Prieto-Ruíz, J. Á., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., Chávez-Simental, J. A., & Mexal, J. G. (2020). Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery. *Forests*, 11(1), 71. <https://doi.org/10.3390/f11010071>
- Mañas, P., Castro, E., Vila, P., & de las Heras, J. (2010). Use of waste materials as nursery growing media for *Pinus halepensis* production. *European Journal of Forest Research*, 129, 521-530. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0349-4>
- Martínez-Nevárez, L. E., Prieto-Ruíz, J. Á., Sigala-Rodríguez, J. Á., García-Rodríguez, J. L., Martínez-Reyes, M., Carrillo-Parra, A., y Domínguez-Calleros, P. A. (2023). Crecimiento y eficiencia en el uso de nutrientes de plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco producidas en vivero con un fertilizante de liberación controlada. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-12. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1707>
- Melo S., F. A., Margueri N., G., Zanon, J. A., Villas B., R. L., & Barboza S., R. (2019). Granulated and biosolid fertilizers on the quality of *Schinus terebinthifolius* Raddi seedlings. *Floresta e Ambiente*, 26(3), Article e20171104. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.110417>
- Moreno G., M., Barbosa G. da S., R., Prado B., F. P. de A., D'Andrea M., C. de M., Villas B., R. L., Rossi, S., Montoro G., M., & Ribeiro da Silva, M. (2021). Composted sewage sludge as an alternative substrate for forest seedlings production. *iForest*, 14(6), 569-575. <https://doi.org/10.3832/ifor3929-014>
- Negi, P. S., Sharma, S., & Thakur, N. (2022). Response of vermicompost on seedling growth and quality parameters of *Juniperus polycarpus* C. Koch under nursery

- condition. *Annals of Arid Zone*, 61(3&4), 181-186.
<https://epubs.icar.org.in/index.php/AAZ/article/view/134413>
- NMX-AA-170-SCFI-2016. (2016). NORMA MEXICANA NMX-AA-170-SCFI-2016. Certificación de la operación de viveros forestales. *Diario Oficial de la Federación*.
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-170-SCFI-2016.pdf>
- NOM-004-SEMARNAT-2002. (2002, 24 de septiembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental.- Lodos y biosólidos.-Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*, 15 de agosto de 2003.
https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0
- Otero, M., Salcedo, I., Txarterina, K., González-Murua, C., & Duñabeitia, M. K. (2020). Compost tea reduces the susceptibility of *Pinus radiata* to *Fusarium circinatum* in nursery production. *Phytopathology*, 110(4), 813-821.
<https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-19-0139-R>
- Palacios R., A., Rodríguez L., R., Prieto G., F., Meza R., J., Razo Z., R., y Hernández F., M. de la L. (2015). Supervivencia de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. en campo mediante la aplicación de espuma fenólica hidratada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(32), 83-92. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i32.100>
- Pallardy, S. G. (2008). *Physiology of woody plants* (3rd Edition). Elsevier Inc.
<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2019/02/Pallardy-2008.pdf>
- Pane, C., Spaccini, R., Piccolo, A., Scala, F., & Bonanomi, G. (2011). Compost amendments enhance peat suppressiveness to *Pythium ultimum*, *Rhizoctonia solani* and *Sclerotinia minor*. *Biological Control*, 56(2), 115-124.
<https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2010.10.002>
- Pineda O., T., Flores A., E., Flores, A., Buendía R., E., Guerra de la C., V., e Islas G., F. (2020). Calidad de planta de seis especies del género *Pinus* producidas en bolsas de polietileno. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(62), 165-174.
<https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.809>

- R Core Team. (2022). R: a language and environment for statistical computing Ver. 4.3.1 [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/>
- Ramírez-Orozco, C. L., Hernández-Díaz, J. C., Carrillo-Parra, A., Wehenkel, C., Quiñones-Pérez, C. Z., López-Sánchez, C. A., & Bailón-Soto, C. E. (2022). The Centre–Periphery model, a possible explanation for the distribution of some *Pinus* spp. in the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Forests*, *13*(2), 215. <https://doi.org/10.3390/f13020215>
- Romero-Arenas, O., Flores F., A. del P., Rivera T., J. A., Hernández A., F., Parraguirre L., J. F. C., Villa R., N., y Landeta C., G. (2019). Producción de plántulas de *Pinus pseudostrobus* en composta a base de residuos de Shiitake en vivero. *Madera y Bosques*, *25*(1), Artículo e2511675. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511675>
- Rueda-Sánchez, A., Benavides-Solorio, J. de D., Saenz-Reyez, J. T., Muñoz F., H. J., Prieto-Ruiz, J. Á., & Orozco G., G. (2014). Calidad de planta producida en los viveros forestales de Nayarit. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *5*(22), 58-73. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i22.350>
- Sáenz R., J. T., Muñoz F., H. J., Pérez D., C. M. Á., Rueda S., A., y Hernández R., J. (2014). Calidad de planta de tres especies de pino en el vivero 'Morelia', estado de Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *5*(26), 98-111. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v5i26.293>
- Simiele, M., De Zio, E., Montagnoli, A., Terzaghi, M., Chiatante, D., Scippa, G. S., & Trupiano, D. (2022). Biochar and/or compost to enhance nursery-produced seedling performance: A potential tool for forest restoration programs. *Forests*, *13*(4), 550. <https://doi.org/10.3390/f13040550>
- Slesak, R. A., Kelso, S. G., & Windmuller-Campione, M. A. (2022). Effect of biochar and manual vegetation control on early growth and survival of planted Jack Pine (*Pinus banksiana* Lamb.) seedlings in Northern Minnesota. *Forest Science*, *68*(1), 104-112. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxab053>
- Thompson, B. E. (1985). Seedling morphological evaluation—What you can tell by looking. In M. L. Durvea (ed.), *Proceedings of Workshop on Evaluating Seedling Quality: Principles, Procedures, and Predictive Abilities of Major Tests* (pp. 59-71).

Oregon State University. https://rngr.net/publications/evaluating/PDF.2003-10-27.0157/at_download/file

Timmer, V. R., & Stone, E. L. (1978). Comparative foliar analysis of young balsam fir fertilized with nitrogen, phosphorus, potassium and lime. *Soil Science Society of America Journal*, 42(1), 125-130. <https://doi.org/10.2136/sssaj1978.03615995004200010027x>

Vandiver, T. A., Fain, G. B., Murphy, A. M., Gilliam, C. H., & Sibley, J. L. (2015). Distilled Eastern redcedar (*Juniperus virginiana* L.) as an alternative substrate in the production of greenhouse-grown annuals. *Journal of Environmental Horticulture*, 33(4), 166-172. <https://doi.org/10.24266/0738-2898-33.4.166>

Vicente-Arbona, J. C., Carrasco-Hernández, V., Rodríguez-Trejo, D. A., y Villanueva-Morales, A. (2019). Calidad de planta de *Pinus greggii* producida en sustratos a base de aserrín. *Madera y Bosques*, 25(2), Artículo e2521784. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521784>

Wang, M., Zhang, Y., Huang, Z., Xue, J., & Gutierrez-Gines, J. M. (2021). Limited potential of biosolids application for long-term soil carbon stabilization in coastal dune forest. *Geoderma*, 403, Article 115384. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115384>



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.