



Efecto del sistema de riego en la germinación y el desarrollo inicial de la raíz de *Pinus engelmannii* Carrière

Effect of the irrigation system on the germination and initial root development of *Pinus engelmannii* Carrière

Enrique Santana-Aispuro¹, Jorge Armando Chávez-Simental^{2*}, José Ángel Sigala-Rodríguez³, Arnulfo Aldrete⁴, José Ángel Prieto-Ruíz⁵, José Rodolfo Goche-Télles⁵

Fecha de recepción/Reception date: 15 de septiembre de 2025.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 3 de febrero de 2026.

¹Universidad Juárez del Estado de Durango. Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales. México.

²Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. México.

³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Norte-Centro, Campo Experimental Valle del Guadiana. México.

⁴Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

⁵Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: jorge.chavez@ujed.mx

*Corresponding author; e-mail: jorge.chavez@ujed.mx

Resumen

En la producción de planta forestal en contenedor se emplean sistemas de riego que influyen directamente en el desarrollo de las plantas. Es importante buscar alternativas que garanticen una distribución uniforme y un aprovechamiento eficiente del agua. En el presente trabajo se midió el gasto de agua de tres sistemas de riego y se evaluó su efecto en la germinación y desarrollo radical de *Pinus engelmannii* en vivero. El ensayo incluyó tres tratamientos: riego por microaspersión, manual y por subirrigación. Se monitoreó la germinación durante 36 días, así como el crecimiento inicial del sistema radical y se midió el gasto de agua y la retención de humedad en el sustrato en cada sistema. Las variables evaluadas fueron: porcentaje y velocidad de germinación, germinación acumulada, valor pico, valor germinativo, coeficiente de uniformidad y crecimiento del sistema radical. El sistema radical se analizó mediante la técnica de análisis de imagen con el programa *RhizoVision*, en el cual se calculó el número de raíces, longitud, superficie de absorción y volumen. Se obtuvo una germinación superior a 80 % en los tres tratamientos, la más alta fue en el sistema de microaspersión. Las plantas con subirrigación tuvieron mayor longitud, superficie y volumen en la región media del envase. El gasto de agua en microaspersión superó 12 veces al de subirrigación. El tipo de sistema de riego influyó en la etapa de germinación y desarrollo radical de *P. engelmannii*. Respecto al uso del agua, el sistema de subirrigación fue más eficiente.

Palabras clave: Eficiencia del riego, emergencia de semilla, microaspersión, pino, subirrigación, vivero forestal.

Abstract

In the production of containerized forest plants, irrigation systems are used that directly influence plant development. It is important to seek alternatives that ensure uniform distribution and efficient use of water. In this study, the water consumption of three irrigation systems was measured, and their effect on the germination and root development of *Pinus engelmannii* in a nursery was evaluated. The trial included three treatments: micro-sprinkler irrigation, manual irrigation, and subirrigation. Germination was monitored for 36 days, and the initial growth of the root system, as well as water consumption and moisture retention in the substrate, were measured in each system. The variables evaluated were: germination percentage and speed, cumulative germination, peak value, germination value, uniformity coefficient, and root system growth. The root system was analyzed using image analysis techniques with RhizoVision, which calculated the number of roots, root length, absorption surface area, and root volume. Germination rates above 80 % were obtained in all three treatments, with the highest rate observed in the micro-sprinkler system. Plants with subirrigation had greater length, surface area, and volume in the middle region of the container. Water usage in micro-sprinkling was 12 times that of sub-irrigation. The type of irrigation system influenced the germination and root development stage of *P. engelmannii*. With regard to water use, the subirrigation system was more efficient.

Keywords: Irrigation efficiency, seed emergence, micro-sprinkling, pine, subirrigation, forest nursery.

Introducción

La producción de planta forestal en vivero debe tener garantizado el suministro de agua a la planta, en cantidad y calidad para un desarrollo óptimo durante todo el ciclo de cultivo (Sánchez-Velázquez et al., 2023). Sin embargo, el desconocimiento de los requerimientos hídricos de las especies forestales, así como las deficiencias técnicas de los sistemas de riego, generalmente resulta en el gasto excesivo de agua (Dumroese et al., 1995). El agua de riego es la vía por la cual los fertilizantes y otros agroquímicos son aplicados al cultivo; no obstante, la que no aprovecha la planta, es fuente de contaminación para el suelo y cuerpos de agua aledaños al vivero (Dumroese et al., 2005). En este contexto, y bajo los retos actuales de escasez de agua, es imprescindible diseñar, mejorar e innovar tecnologías y procesos para incrementar la eficiencia de los sistemas de riego en los viveros forestales (de Carvalho et al., 2025). En México, el sistema de producción de planta forestal predominante se realiza en contenedor y, en su mayoría, las especies cultivadas corresponden al género *Pinus* L. (Comisión Nacional Forestal [Conafor], 2023). En este esquema se manejan diversos sistemas de riego, cuya elección está determinada por factores como la

especie, tipo de sustrato, tamaño de contenedor, costos de instalación y mantenimiento. No obstante, en cualquiera de los casos, la efectividad del riego es una consideración importante debido a que la planta está confinada a un espacio limitado por el envase y su único acceso al líquido es a través de dicho sistema (Cartes-Rodríguez *et al.*, 2019). La elección del sistema de riego y su mantenimiento son imprescindibles, ya que el funcionamiento inadecuado puede ocasionar daño o pérdidas en la producción (López-Martínez *et al.*, 2014).

El manejo del riego varía según la etapa de desarrollo de la planta; el crecimiento inicial de la plántula demanda atención especial, ya que se debe crear la condición de humedad idónea para la germinación y desarrollo temprano del sistema radical. Los sistemas de riego por microaspersión o de forma manual, en etapa de germinación, deben ser superficiales y frecuentes, en los que se procura un tamaño de gota fina para evitar que la semilla quede expuesta y pierda la humedad requerida para la germinación (Sánchez-Velázquez *et al.*, 2023).

El método de subirrigación es poco utilizado en la producción de planta forestal; este sistema permite que el movimiento del agua y nutrientes se realice de forma ascendente a través del sustrato, por acción capilar desde la parte inferior de los contenedores (Ferrarezi *et al.*, 2015); por ser un sistema cerrado permite recircular el agua y nutrientes, lo que reduce el gasto de agua entre 70 y 87 % (Ramírez-Galicia *et al.*, 2022), y representa una ventaja determinante ante la problemática actual de escasez de agua.

Los viveristas conocen la relevancia de la disponibilidad de agua para el cultivo de planta forestal; aunque se presta poca atención a la eficiencia del método o sistema de riego empleado, particularmente en la etapa inicial de establecimiento, la cual es importante para garantizar el éxito de la producción. Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el gasto de agua de tres sistemas de riego: microaspersión, subirrigación y manual, así como su efecto en la germinación y desarrollo radical de *Pinus engelmannii* Carrière en vivero.

Materiales y Métodos

Localización del estudio y condiciones de cultivo

El estudio se desarrolló en el vivero forestal Praxedis Guerrero, de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SRNMA) del Gobierno del Estado de Durango, México; localizado en Durango, Durango, en las coordenadas 23°56'58.3" N y 104°34'07.4" O, a una altitud de 1 890 m.

La planta se produjo en un invernadero tipo túnel de 10.7 m de ancho por 56 m de largo, con una altura al cenit de 4.4 m, cubierto con dos capas: la inferior consiste en una malla sombra negra de polietileno al 50 % de transmisividad de luz; la superior en una cubierta plástica color verde clorofila calibre 720 galgas con protección a rayos ultravioleta, al 80 % de transmisividad.

Las semillas de *P. engelmannii* se recolectaron en un rodal semillero situado en el predio La Mesa, localidad de Santa Isabel de Batres, municipio Durango, Durango (24°11'47.75" N y 104°53'43.62" O), a una altitud de 2 488 m. La semilla se obtuvo en enero de 2016 y permaneció almacenada a 4 °C hasta su uso (cuarto frío, equipo de refrigeración *Danfoss*® MTZ050-4, México). Se utilizaron envases de polietileno rígido de color negro con guías de raíces internas, de 4 cm de diámetro superior, 20.7 cm de largo y con capacidad de 160 mL. Los envases se dispusieron en charolas porta tubetes con 98 cavidades, 60.5 cm de largo y 31 cm de ancho. El sustrato fue una mezcla de turba (50 %), vermiculita (25 %) y perlita (25 %), con una porosidad total de 60.4 %, porosidad de aireación de 34.4 % y una capacidad de retención de agua de 26 %.

Previo a la siembra, la semilla se sumergió en agua a temperatura ambiente durante 24 h, la cual se cambió cada 8 h. Después, se aplicó fungicida carbendazim *Prozycar*® 500 F (México) para prevenir daños por hongos, y finalmente se dejó secar al aire

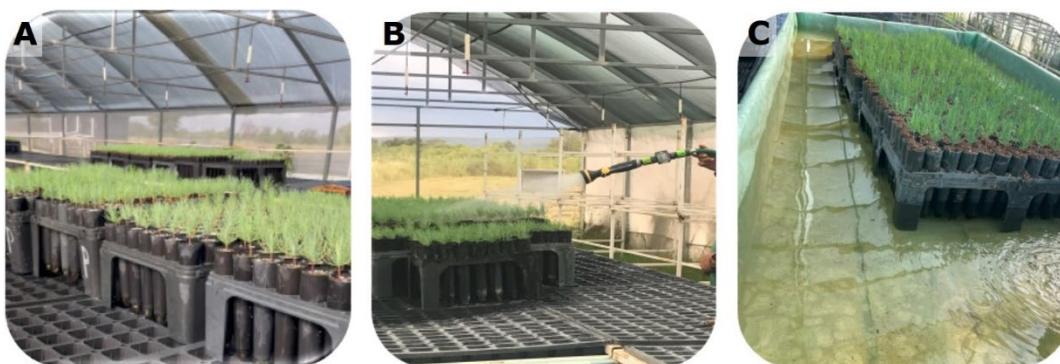
libre en sombra. La siembra se realizó el 30 de julio de 2024. Para ello, se colocó una semilla por envase, a una profundidad de 1 cm y se cubrió con el mismo sustrato. Durante el periodo de evaluación de 36 días, el promedio de temperatura y humedad relativa fue de 21.6 °C y 61.5 %, respectivamente.

Sistemas de riego evaluados

El experimento estuvo integrado por tres tratamientos distribuidos completamente al azar, correspondientes a los tres sistemas de riego (microaspersión aérea, riego manual y subirrigación); cada uno se integró de tres repeticiones, cinco charolas de 98 cavidades por repetición en cada sistema de riego (Cuadro 1, Figura 1); en total, se utilizaron 45 charolas.

Cuadro 1. Descripción de los sistemas de riego evaluados en la germinación y desarrollo inicial de *Pinus engelmannii* Carrière.

Sistema de riego	Componentes
Microaspersión	Compuesto por tuberías primarias (PVC de 2") y tuberías secundarias (polietileno de 1/2"), de las cuales se derivan las tuberías terciarias (polietileno de 3 mm), que soportan los emisores que tienen un radio de aspersión de 3 m.
Manual	Compuesto por tubería primaria (PVC de 2"), con válvula de salida de 3/4" en la cual se conecta manguera de la misma medida con boquilla para cabezal rociador marca <i>Melnor</i> ® con cabezal de ducha y medidas de 20.8×6.5 cm.
Subirrigación	Tinaco de 1 100 L con tubería de salida de 1 1/4" que alimenta a tinas de 1.20 m de ancho por 3 m de largo y 25 cm de altura, las cuales están colocadas en mesas de metal a una altura de 95 cm.



A = Sistema de microaspersión; B = Sistema manual; C = Sistema de subirrigación.

Figura 1. Vista general de los sistemas de riego evaluados en la germinación y desarrollo inicial de *Pinus engelmannii* Carrière.

El invernadero se dividió en tres áreas, cada una para un tipo de sistema de riego, el agua provenía de un depósito principal con capacidad de 330 m³; mediante el uso de una bomba hidráulica de 3.5 HP, el agua se transportó a la estructura de producción a través de una tubería principal de PVC de 4" provista con filtros de anillas ranuradas.

Análisis del gasto de agua

El gasto de agua se registró por tipo de sistema en cada riego, el cual se realizó cada tercer día para el sistema de microaspersión y manual, mientras que en el sistema de subirrigación fue dos veces por semana; la duración del riego fue de 45 minutos. En el caso de microaspersión, se realizó con un medidor electrónico de flujo de turbina de 2" (marca *Ticfox*® modelo OEM) ensamblado a la tubería principal interna del invernadero; al registro total de agua (considerando área de pasillos, cabeceras y mesas de producción) se le restó 20 % referido a los espacios no productivos en las mesas. El riego manual se hizo con un medidor de flujo digital marca *Rainpoint*®

modelo ICS006-DLS, dispuesto al final de la manguera de riego de $\frac{3}{4}$ ". Para el sistema de subirrigación, cada semana se midió de manera directa la reducción del volumen de agua del tinaco con una cinta métrica *Truper*® modelo FH-5M. Posteriormente, se aplicó la fórmula de volumen de un cilindro.

La retención de agua en el sustrato se determinó en dos ocasiones durante el periodo de evaluación. Para ello, las charolas se pesaron en seco en una báscula *Pretul*® modelo base-40P, previo a la aplicación del riego. En seguida, se realizó el riego normal en cada sistema; al cumplirse una hora, se procedió a registrar el nuevo peso, posteriormente se calculó la diferencia entre ambos registros y se obtuvo el volumen de agua retenido en el sustrato.

Análisis de germinación de semillas

La germinación de las semillas y emergencia de las plántulas se evaluaron cada dos días, a partir de la siembra durante 36 días. La emergencia de una plántula se consideró cuando el hipocótilo apareció sobre el nivel del sustrato. Se determinó el porcentaje de germinación (International Seed Testing Association [ISTA], 2015), T_{50} (Coolbear *et al.*, 1984) y velocidad de germinación (Bewley & Black, 1994), así como el valor germinativo (Czabator, 1962), valor pico (Bonner, 1967) y el coeficiente de uniformidad (Bewley & Black, 1994).

Análisis de raíz

Cuando las plantas alcanzaron la edad de 28 días, al término de la germinación se realizó el análisis de raíz, para lo cual se seleccionaron aleatoriamente cuatro plantas por repetición; se retiró el sustrato por medio de lavado con agua, para enseguida digitalizar la raíz con un escáner marca *Brother*[®] modelo T720DW con un fondo negro a 600 dpi. Una vez realizado el proceso de digitalización, cada imagen de raíz completa se seccionó en tres partes iguales, dividiendo el total de la longitud del envase (21 cm) para obtener tres segmentos de raíz de 7 cm cada uno, definiendo tres secciones: parte alta, media y baja. En cada sección de la raíz se realizaron las mediciones como número total, longitud, superficie de absorción y volumen de raíces utilizando el software *RhizoVision Explorer*[®] versión 2.0.3 (Seethepalli et al., 2021).

Análisis estadístico

Los datos de los parámetros germinativos y de crecimiento radical por sección se analizaron mediante ANOVA de una vía. Para los porcentajes de germinación y número de raíces se ajustó un modelo lineal generalizado con distribución binomial y *Poisson*, respectivamente. Cuando el efecto del sistema de riego fue significativo, se realizó una prueba de comparación de medias de *Tukey* con un $\alpha=0.05$. En todas las variables se probaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los residuales. En los casos en que no se cumplieron dichos supuestos, la variable se transformó con la función logarítmica. El análisis estadístico se hizo con el *software R* versión 4.4.1 (R Core Team, 2024).

Resultados y Discusión

Gasto y retención de agua

Durante la etapa de germinación (36 días), el gasto total de los tres sistemas de riego fue de 14 203 L; la diferencia entre valores extremos fue 9 562 L; el sistema que ahorró más agua fue el de subirrigación, lo contrario ocurrió con el de microaspersión (Figura 2).

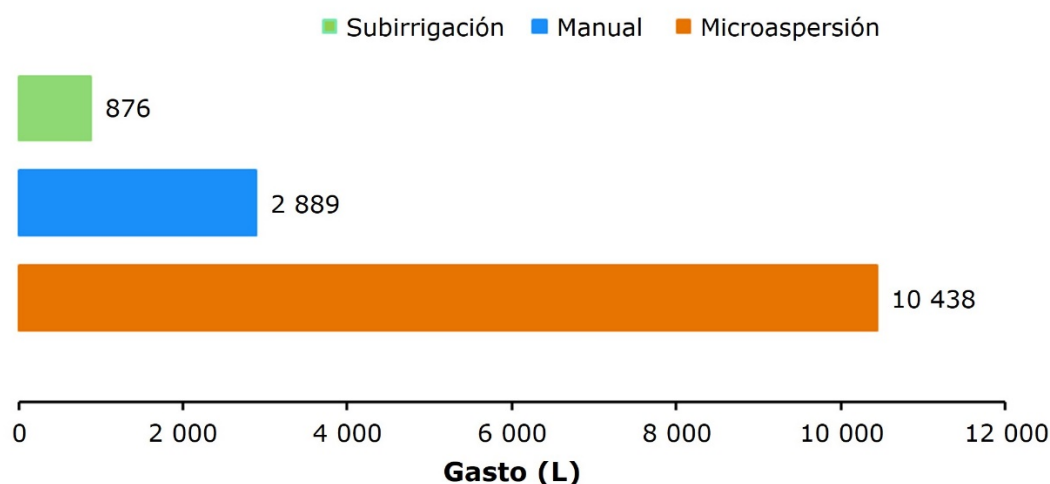


Figura 2. Volumen de agua utilizado por cada sistema de riego durante un periodo de 36 días.

La retención de agua presentó variación entre sistemas, así como el número de riegos aplicados. El sustrato con riego manual retuvo mayor volumen de agua, mientras que el del riego por microaspersión conservó la menor cantidad, ambos recibieron igual número de riegos (Cuadro 2). Las diferencias en la retención de agua en estos sistemas pueden atribuirse a que en el riego manual el agua se aplica en forma más intensa, por lo que se saturan más rápido los espacios porosos; en el sistema por

microaspersión, la intensidad del riego es menor y más tardada, lo cual provoca que la saturación de los espacios porosos del sustrato sea más lenta; además, parte del agua cae en espacios muertos (Aldrete et al., 2023).

Cuadro 2. Volumen de agua retenido en cada sistema de riego.

Tratamiento	Riegos (Núm.)	Retención por riego (L)	Retención total (L)
Microaspersión	16	22.1	353.6
Manual	16	29.5	472.0
Subirrigación	12	33.4	400.8

González-Torralva y López-López (2024) citaron un gasto total de 2 732 L en un sistema de subirrigación para la producción de planta de pino, mayor al gasto del presente ensayo, debido a que consideraron un periodo más amplio (8 meses, sin contemplar la etapa de germinación). Por otro lado, el gasto de agua en el sistema por subirrigación, se aproximó al gasto indicado por Ramírez-Galicia et al. (2022), quienes registraron un consumo de 1 159 L en etapa inicial de producción de planta forestal. Esta diferencia puede deberse a que la etapa inicial comprende desde la siembra hasta la fase final del establecimiento, aproximadamente de dos a tres meses (Aldrete et al., 2023). De acuerdo con López-López et al. (2023), el sistema de subirrigación resultó ser más eficiente; ellos determinaron que el sistema de aspersión/regadera tiene un gasto doble de agua, comparado con el de subirrigación. En este caso, el gasto de microaspersión y riego manual fue 12 y 4 veces mayor, respectivamente, que el de subirrigación.

La retención de agua por planta es una variable importante desde el punto de vista de su uso eficiente; durante la producción de planta se aplicaron de dos a tres riegos por semana en función de las condiciones climáticas prevalecientes; para definir la cantidad de agua aplicada se siguió el criterio de González-Alemán et al. (2025), quienes sugirieron mantener la humedad en al menos las dos terceras partes inferiores del envase, de manera que no se limite el crecimiento del sistema radical.

Sin embargo, a futuro sería interesante basar la periodicidad y cantidad de agua por aplicar con base en el porcentaje de humedad en el sustrato.

El sustrato utilizado en este trabajo tuvo una capacidad de retención de agua de 26 %; sin embargo, no fue la misma en los diferentes sistemas de riego. En el caso de subirrigación, la disponibilidad y distribución del agua dentro del envase fue homogénea durante el lapso del riego, lo que favoreció el movimiento capilar. En los otros dos sistemas, el volumen de agua fue irregular, lo que afectó la retención de agua a pesar de utilizar el mismo tipo de sustrato para todos los tratamientos. Esto coincide con lo señalado por Díaz-Blanco *et al.* (2025), quienes observaron que el sistema de microaspersión no resulta en una distribución uniforme del agua dentro del área de producción, por lo que el sistema de subirrigación se muestra como alternativa más eficiente.

Germinación

La emergencia inició a partir del octavo día después de la siembra (DDS); el máximo acumulado se alcanzó a los 26 días. En el sistema de microaspersión se presentó el mayor porcentaje (Cuadro 3); con 50 % de germinación (T_{50}) a los 10 días, sin diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.0952$). En la velocidad de germinación y valor germinativo se observaron diferencias significativas ($p=0.0002$ y $p=0.0004$, respectivamente). Los mejores resultados se registraron en los sistemas de microaspersión y subirrigación. En el valor pico, sobresalió el sistema de microaspersión ($p=0.0151$), mientras que el de subirrigación presentó el mayor coeficiente de uniformidad ($p=0.0494$) (Cuadro 3). En los casos donde hubo diferencias significativas, el riego manual tuvo valores bajos.

Cuadro 3. Valores promedio de los parámetros germinativos de *Pinus engelmannii* Carrière en diferentes sistemas de riego.

Variable	Sistema de riego			Valor <i>p</i>
	Manual	Microaspersión	Subirrigación	
<i>PG</i> (%)	81.4±0.22 c	88.7±0.23 a	85.3±0.17 b	<0.001
<i>T</i> ₅₀ (días)	10.2±0.02 a	10.1±0.03 a	9.8±0.02 a	0.0952
<i>V</i> (días)	7.2±0.12 b	7.86±0.11 a	7.72±0.09 a	0.0002
<i>VG</i>	14.98±0.4 b	17.52±0.5 a	16.65±0.4 a	0.0004
<i>VP</i>	5.87±0.09 b	6.31±0.14 a	6.23±0.1 ab	0.0151
<i>CU</i>	0.19±0.01 b	0.25±0.03 ab	0.29±0.03 a	0.0494

PG = Porcentaje de germinación; *T*₅₀ = 50 % de germinación; *V* = Velocidad de germinación; *VG* = Valor germinativo; *VP* = Valor pico; *CU* = Coeficiente de uniformidad. Letras diferentes en la misma fila indican diferencia estadística entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

En el inicio del proceso germinativo, en la semilla se activa el mecanismo de imbibición, en el cual la disponibilidad de humedad tiene un papel crucial (Hernández-Anguiano et al. 2018). De ahí la importancia de la eficiencia del sistema de riego, así como del medio de crecimiento, ya que las características del sustrato utilizado pueden o no favorecer el contenido de humedad. En la producción de planta de pino se usa comúnmente la mezcla base, que se compone por turba, vermiculita y perlita (2:1:1 v/v, respectivamente), componentes que presentan una alta retención de humedad (Aguilera-Rodríguez et al., 2023).

La inexistencia de estudios sobre sistemas de riego y germinación en *P. engelmannii* restringe el contraste de los resultados; no obstante, el porcentaje de germinación obtenido en los tres sistemas de riego fue superior al citado por Prieto-Ruíz y Rubio-Chaidez (1994), quienes al estudiar el efecto de la profundidad de siembra de semilla en un intervalo de 0.5 a 2.0 cm en sustrato de 100 % limo, observaron que a menor profundidad de siembra (0.5 cm) el porcentaje de germinación fue mayor (66 %), además registraron 50 % de germinación (*T*₅₀) a los 16 días; es decir, la demora fue

mayor que en el presente estudio (10 días). Estas diferencias pueden atribuirse a que la humedad en el sistema de microaspersión se concentra en la parte superior, así como al sustrato utilizado, ya que la mezcla base provee propiedades físicas que difícilmente un sustrato de limo puede reunir.

Por su parte, Bustamante-García *et al.* (2012) obtuvieron 98 % de germinación en *P. engelmannii* con semillas procedentes de rodales semilleros. Este resultado es superior al del presente estudio, lo cual se atribuye a la pérdida de viabilidad de la semilla por el periodo transcurrido desde su recolecta (2016), hasta la siembra (2024). Existen otras investigaciones en el género *Pinus* que analizan factores que influyen en la germinación, tal es el caso de Mendizábal-Hernández *et al.* (2015), quienes evaluaron la germinación de *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., y el de Sánchez-Mendoza *et al.* (2023) que analizaron semillas de *Pinus hartwegii* Lindl., solo que no evalúan el factor del riego; en sus investigaciones consideran que la germinación fue afectada por características fenotípicas y de procedencia de las semillas, mientras que en el presente estudio se remarca el papel crucial de la humedad para que la semilla germine.

Desarrollo radical

El número de raíces que desarrollaron las plantas en los diferentes sistemas en las tres secciones del envase, presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.0001$, $p = 0.0035$, $p = 0.054$, para la sección alta, media y baja, respectivamente). Las plantas del sistema de subirrigación y microaspersión mostraron mayor número de raíces en la parte alta y media del envase; en las plantas del riego manual se observó un sistema radical pobre, aunque más homogéneo en las tres secciones del envase. En longitud de raíces, solo en la sección baja no hubo diferencia estadística ($p = 0.631$); las raíces de la parte media tuvieron mayor longitud, sobresaliendo el sistema de subirrigación ($p = 0.0433$). En la parte alta, en el sistema de microaspersión las raíces

fueron más largas ($p=0.0034$). Para las variables de superficie y volumen solo se registraron diferencias estadísticas en la sección media del envase, y el sistema de subirrigación resultó superior en estas variables ($p=0.048$, $p=0.033$, respectivamente; Figura 3).

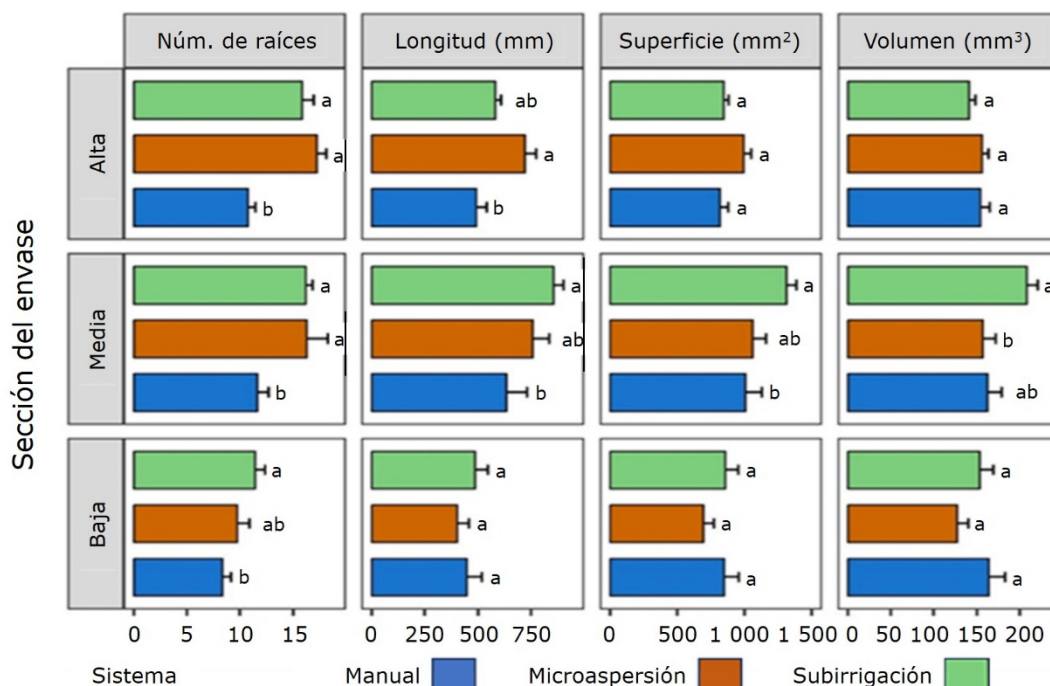


Figura 3. Características de la raíz de *Pinus engelmannii* Carrière por sistema de riego.

El sistema por subirrigación no es común utilizarlo en los viveros forestales del país (Aldrete et al., 2023). Esto, a pesar de la eficiencia en el gasto de agua referida anteriormente, se debe a que solo existe un estudio que considera la producción de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. y *Pinus pseudostrobus* Lindl. de Ramírez-Galicia et al. (2022) quienes registraron un ahorro mayor a 50 % en comparación con el riego manual, además de que se mantuvo la calidad de la planta. Aunque, no exploran el desarrollo radical de las especies referidas.

Por su parte, Gallegos et al. (2020) señalan que cuando se produce planta en contenedor, el sistema radical tiende a desarrollarse más en el fondo del envase y en la periferia, debido a la compactación por manipulación o bien por el impacto del riego

sobre el sustrato; en el presente ensayo la sección baja no mostró este efecto, posiblemente porque la evaluación se realizó a casi un mes de la siembra.

Pang et al. (2024) indican que la longitud total de la raíz y el número de raíces tienen mayor influencia en el anclaje de las plantas en campo. En el presente estudio el número mayor de raíces se observó en las plantas de los sistemas de microaspersión y subirrigación en la parte alta y media del envase; por lo anterior, se puede esperar que estos sistemas radicales favorezcan el desarrollo morfológico en etapas posteriores, ya que, como mencionan Bar-Tal et al. (1997), la dimensión del sistema radical está directamente relacionada con la eficiencia en la absorción de agua y nutrientes, lo que incide en el desarrollo de la raíz, que aunado a la colonización fúngica micorrízica y sus efectos positivos, permiten la adaptación de la planta en las etapas subsecuentes del proceso productivo (Eissenstat et al., 2000; Salcido-Ruiz et al., 2020).

Existen otras características adaptativas de los sistemas radicales que responden a diferentes factores ambientales y a nivel de la rizósfera, pero es evidente que la disponibilidad del agua en particular desempeña un papel fundamental en la evolución de la arquitectura de los sistemas radicales (Sung et al., 2019). Desde el punto de vista funcional, hay raíces finas con funciones primarias para la absorción de agua y nutrientes, mientras que otras participan en su transporte y almacenamiento (Eissenstat et al., 2000).

Conclusiones

En el sistema de riego por subirrigación el gasto de agua es menor en comparación con los sistemas de microaspersión y manual. El tipo de sistema de riego tiene un efecto significativo en la etapa de germinación y desarrollo radical de *P. engelmannii* en vivero. La emergencia de las plántulas es mayor en el sistema de microaspersión, mientras que el desarrollo de raíces en el sistema por subirrigación presenta mayor longitud, superficie y volumen en la parte media del envase en comparación con los

otros dos sistemas. Esta investigación aporta conocimiento técnico para hacer un uso más eficiente del agua de riego durante el ciclo productivo de planta forestal en vivero.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti), por el apoyo otorgado al autor principal de esta investigación dentro del marco del Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad Juárez del Estado de Durango. A la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente del Estado de Durango, por el apoyo con infraestructura y materiales en el vivero forestal "Praxedis Guerrero".

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Enrique Santana-Aispuro: ejecución y gestión de la investigación, toma y análisis de datos, interpretación de resultados y redacción del manuscrito; Jorge Armando Chávez-Simental: gestión de la investigación, supervisión de la investigación, diseño metodológico, verificación de resultados, interpretación de resultados y revisión del manuscrito; José Ángel Sigala-Rodríguez: análisis estadístico, interpretación de resultados y revisión del manuscrito; Arnulfo Aldrete: diseño metodológico, interpretación de resultados, revisión del manuscrito; José Ángel Prieto-Ruíz: revisión del manuscrito; José Rodolfo Goche-Télles: análisis estadístico y revisión del manuscrito.

Referencias

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Sánchez-Velázquez, J. R., & Prieto-Ruiz, J. Á. (2023). Instalaciones e insumos para la producción. En A. Aldrete, J. R. Sánchez-Velázquez, M. Aguilera-Rodríguez, D. Cibrián-Tovar & S. E. García-Díaz (Eds.), *Manual de buenas prácticas para el manejo de la salud de planta en viveros forestales* (pp. 41-90). Universidad Autónoma Chapingo. <https://es.scribd.com/document/829229770/ManualBuenasPrcticas-150-MEDIA1>
- Aldrete, A., Sánchez-Velázquez, J. R., Aguilera-Rodríguez, M., Cibrián-Tovar, D., & García-Díaz, S. E. (Eds.). (2023). *Manual de buenas prácticas para el manejo de la salud de planta en viveros forestales*. Universidad Autónoma Chapingo. <https://es.scribd.com/document/829229770/ManualBuenasPrcticas-150-MEDIA1>
- Bar-Tal, A., Ganmore-Neumann, R., & Ben-Hayyim, G. (1997). Root architecture effects on nutrient uptake. In A. Altman & Y. Waisel (Eds.), *Biology of root formation and development* (pp. 39-75). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5403-5_5
- Bewley, J. D., & Black, M. (1994). *Seeds: physiology of development and germination*. Plenum Press. https://books.google.com.mx/books?id=W6EbrewcpDwC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r#v=onepage&q&f=false
- Bonner Jr., W. D. (1967). A general method for the preparation of plant mitochondria. In R. W. Estabrook & M. E. Pullman (Eds.), *Oxidation and Phosphorylation* (Vol. 10, Series Methods in enzymology, pp. 126-133). Academic press. [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(67\)10027-X](https://doi.org/10.1016/0076-6879(67)10027-X)
- Bustamante-García, V., Prieto-Ruíz, J. Á., Merlín-Bermudes, E., Álvarez-Zagoya, R., Carrillo-Parra, A., & Hernández-Díaz, J. C. (2012). Potencial y eficiencia de producción de semilla de *Pinus engelmannii* Carr., en tres rodales semilleros del estado de Durango, México. *Madera y Bosques*, 18(3), 7-21. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712012000300002&script=sci_arttext
- Cartes-Rodríguez, E., Acevedo-Tapia, M., González-Ortega, M., Álvarez-Maldini, C., Mena-Marín, P., & García-Rivas, E. (2019). *Manual de manejo de riego y fertilización*

en viveros de plantas a raíz cubierta [Manual 51]. Instituto Forestal.
<https://share.google/7KZ4298LNAdmksjM3>

Comisión Nacional Forestal. (2023, 27 de octubre). *Estado que guarda el sector forestal en México 2022*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estado-que-guarda-el-sector-forestal-en-mexico-2022-349939>

Coolbear, P., Francis, A., & Grierson, D. (1984). The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. *Journal of Experimental Botany*, 35(11), 1609-1617.
<https://doi.org/10.1093/jxb/35.11.1609>

Czabator, F. J. (1962). Germination value: An index combining speed and completeness of pine seed germination. *Forest Science*, 8(4), 386-396.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/8.4.386>

de Carvalho, D. F., de O.-Silva, L., Suriani, M. C. V., de O.-da Silva, L., da Rocha, J. G., & dos S.-Leles, P. S. (2025). Growth of tree species seedlings under shading levels and automatic irrigation management. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 29(5), Article e287662. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n5e287662>

Díaz-Blanco, G. G., Salcido-Ruiz, S., Prieto-Ruíz, J. A., Santana-Aispuro, E., Chávez-Simental, J. A., & Madrid-Aispuro, R. E. (2025). Determination and adjustment of the irrigation uniformity coefficient: a case study in a forest nursery in Durango, Mexico. *Agro Productividad*, 18(11), 47-55. <https://doi.org/10.32854/ptdnsr22>

Dumroese, R. K., Page-Dumroese, D. S., Salifu, K. F., & Jacobs, D. F. (2005). Exponential fertilization of *Pinus monticola* seedlings: nutrient uptake efficiency, leaching fractions, and early outplanting performance. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(12), 2961-2967. https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/ja/ja_dumroese013.pdf

Dumroese, R. K., Wenny, D. L., & Page-Dumroese, D. S. (1995). Nursery waste water: The problem and possible remedies. In T. D. Landis & B. Cregg (Tech. Coords.), *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations* [General Technical Report PNW-GTR-365] (page 89). United States Department of Agriculture. <https://rngr.net/publications/proceedings/1995/dumroese.pdf>

- Eissenstat, D. M., Wells, C. E., Yanai, R. D., & Whitbeck, J. L. (2000). Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist*, 147(1), 33-42. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00686.x>
- Ferrarezi, R. S., Weaver, G. M., van Iersel, M. W., & Testezlaf, R. (2015). Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. *HortTechnology*, 25(3), 262-276. <https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/25/3/article-p262.xml>
- Gallegos, J., Álvaro, J. E., & Urrestarazu, M. (2020). Container design affects shoot and root growth of vegetable plant. *HortScience*, 55(6), 787-794. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14954-20>
- González-Alemán, M. A., Aguilera-Rodríguez, M., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., Madrid-Aispuro, R. E., & Prieto-Ruíz, J. Á. (2025). Growth of *Pinus durangensis* Mart. in response to substrate types and controlled-release fertilizer rates in a nursery. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 31, Article e24039. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.09.039>
- González-Torralva, F. L., & López-López, M. Á. (2024). Fertirriego por inundación: una opción para ahorrar agua en viveros forestales. En S. I. Jiménez-Jiménez, M. de J. Marcial-Pablo, I. Sánchez-Cohen & M. A. Inzunza-Ibarra (Comps.), *IX Congreso Nacional y II Congreso Internacional de Riego, Drenaje y Biosistemas* (COMEII-2400). Universidad Autónoma Chapingo. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2024/assets/files/thematicPresentationExtended/24037-Extenso.pdf>
- Hernández-Anguiano, L. A., López-Upton, J., Ramírez-Herrera, C., & Romero-Manzanares, A. (2018). Variation in germination and vigor of *Pinus cembroides* and *Pinus orizabensis* seeds. *Agrociencia*, 52(8), 1161-1178. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1730>
- International Seed Testing Association. (2015). Chapter 5: The germination test. In International Seed Testing Association (Ed.), *International Rules for Seed Testing* (pp. 5-56). International Seed Testing Association. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3988692>
- López-López, M. Á., Martínez-Velasco, L. E., González-Torralva, F. L., Ramírez-Galicia, K., Valencia-Trejo, G. M., Hernández-Valera, R. R., Sánchez-Guerrero, A., &

- Juárez-Mirón, F. (2023). Innovaciones al sistema de fertirriego en viveros forestales y transferencia de la tecnología. En M. E. López-Vázquez, O. H. Tosquy-Valle, N. Peralta-Antonio, R. L. Rebolledo-García & Á. Capetillo-Burela (Eds.), *Ciencia y tecnología para un campo productivo y sustentable* (pp. 1959-1973). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. <https://es.scribd.com/document/723264210/Ciencia-y-TecnologiaRCVer2023>
- López-Martínez, P. L., Villalón-Mendoza, H., Yerena-Yamallel, J. I., Jiménez-Pérez, J., Guevara-González, J. A., & Martínez-Barrón, R. A. (2014). Sistemas de riego para la producción de planta de *Prosopis laevigata* (Humb & Bonpl. ex. Wild), M.C. Johnst. en vivero forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 10(2), 45-51. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/231>
- Mendizábal-Hernández, L. del C., Alba-Landa, J., Rodríguez-Juárez, M. C., Ramírez-García, E. O., Márquez-Ramírez, J., & Cruz-Jiménez, H. (2015). Estudio de germinación de cinco procedencias de *Pinus greggii* Engelm. *Foresta Veracruzana*, 17(1), 49-56. <https://www.redalyc.org/journal/497/49742125007/html/>
- Pang, Z., Zhang, Y., Han, S., Wang, E., & Chen, X. (2024). Effects of root architecture on uprooting properties between deciduous and evergreen species with different growth habits. *Forests*, 15(4), 585. <https://doi.org/10.3390/f15040585>
- Prieto-Ruíz, J. Á., & Rubio-Chaidez, F. (1994). Efecto de cinco profundidades de siembra en la emergencia de *Pinus engelmannii*, en almacigo. *Revista Ciencia Forestal en México*, 19(76), 77-87. <https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/1034>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing* (version 4.4.1) [Software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramírez-Galicia, K., López-López, M. Á., Cetina-Alcalá, V. M., & Mohedano-Caballero, L. (2022). Prototipo de vivero forestal con fertirriego por subirrigación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 13(74), 174-185. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i74.1195>
- Salcido-Ruiz, S., Prieto-Ruíz, J. Á., García-Rodríguez, J. L., Santana-Aispuro, E., & Chávez-Simental, J. A. (2020). Mycorrhiza and fertilization: Effect on the production

of *Pinus engelmannii* Carr. in nursery. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(3), 327-342. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.11.080>

Sánchez-Mendoza, J. L., Jiménez-Casas, M., Ramírez-Herrera, C., & Viveros-Viveros, H. (2023). Calidad de semilla y crecimiento de planta en poblaciones y altitudes de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 14(75), 143-165. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i75.1297>

Sánchez-Velázquez, J. R., Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., & Torres-Pérez, J. A. (2023). 1. Planeación, administración y control de la producción. En A. Aldrete, J. R. Sánchez-Velázquez, M. Aguilera-Rodríguez, D. Cibrián-Tovar & S. E. García-Díaz (Eds.). *Manual de buenas prácticas para el manejo de la salud de planta en viveros forestales* (pp. 3-18). Universidad Autónoma Chapingo. <https://es.scribd.com/document/829229770/ManualBuenasPrcticas-150-MEDIA1>

Seethepalli, A., Dhakal, K., Griffiths, M., Guo, H., Freschet, G. T., & York, L. M. (2021). RhizoVision Explorer: open-source software for root image analysis and measurement standardization. *AoB PLANTS*, 13(6), Article plab056. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plab056>

Sung, S.-J. S., Dumroese, R. K., Pinto, J. R., & Sayer, M. A. S. (2019). The persistence of container nursery treatments on the field performance and root system morphology of longleaf pine seedlings. *Forests*, 10(9), Article 807. <https://doi.org/10.3390/f10090807>



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.