

EFFECTO DE LA CONDICIÓN AMBIENTAL Y LA FERTILIZACIÓN EN EL PREACONDICIONAMIENTO DE *Pinus engelmannii* Carr. EN VIVERO

ENVIRONMENTAL CONDITIONS AND FERTILIZATION EFFECT ON *Pinus engelmannii* Carr. HARDENING IN NURSERY

José L. García-Pérez^{1,2}, Arnulfo Aldrete^{2*}, Javier López-Upton², J. Jesús Vargas-Hernández³ y José A. Prieto-Ruíz⁴

¹Sitio Experimental La Campana-Madera, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Km. 33.3 Carr. Chihuahua-Ojinaga. 32910, Cd. Aldama, Chihuahua. ²Postgrado en Ciencias Forestales, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, México. ³COMERGE A. C., Calle Nacional No. 25, San Miguel Tocuila. 56208, Texcoco, México. ⁴Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y Boulevard Durango s/n, Colonia Valle del Sur. 34120, Durango, Durango, México.

*Autor de correspondencia (aaldrete@colpos.mx)

RESUMEN

El preacondicionamiento tiene como propósito aclimatar la planta a las condiciones adversas de los sitios de plantación. Aquí se evaluaron características morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr. durante el preacondicionamiento, bajo cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie) y un tratamiento adicional (intemperie más un nivel de fertilización de 50 ppm de N, P y K); también se evaluó su respuesta en campo después del trasplante. Las plantas que permanecieron 2 meses en intemperie o en intemperie más fertilización presentaron los mayores incrementos ($P \leq 0.05$) en biomasa radical (38 %) y biomasa total (32 %), en volumen de raíz (30 %) y en la relación parte aérea/raíz (28 %). El diámetro del tallo y la biomasa aérea fueron menos sensibles, al haber incrementado solo 18 y 6 % en los mismos tratamientos. Las plantas de los tratamientos de intemperie más fertilización y de invernadero mostraron mayores aumentos en la concentración y contenido de nutrimentos en el follaje. La concentración de nitrógeno fue 30 % mayor en el tratamiento de intemperie con fertilización, en comparación con intemperie sin fertilización; la concentración de fósforo fue 57 y 43 % y la de potasio 42 y 58 % mayor en esos tratamientos, con relación al de intemperie sin fertilización. El potencial de crecimiento radical fue mayor en el tratamiento de intemperie, con incrementos de 67 % en número, 53 % en longitud y 35 % en biomasa de raíces nuevas, con respecto al tratamiento de invernadero. Las mejores características morfológicas y fisiológicas de calidad de planta se obtuvieron cuando las plantas se preacondicionan a la intemperie durante dos meses sin fertilización. No obstante, después de 120 d en campo solo se detectaron ganancias en la tasa relativa de crecimiento ($P \leq 0.05$).

Palabras clave: *Pinus engelmannii*, calidad de planta, fisiología, morfología, nutrimentos.

SUMMARY

The hardening stage in the nursery acclimatizes seedlings for the harsh conditions at the planting site. This study evaluated morphological and physiological characteristics on *Pinus engelmannii* Carr. during the hardening stage at the nursery, at four shading conditions (greenhouse, outdoor, outdoor shade-cloth, and shade-cloth combination) and an additional fertilization treatment (outdoor condition fertilized at 50 ppm of N, P and K); onfield performance was

also evaluated. After two months of hardening, seedlings exposed to outdoor conditions and outdoor plus fertilization showed the largest increments ($P \leq 0.05$) in root (38 %) and total dry biomass (32 %), root volume (30 %), and shoot/root ratio. Root collar diameter and above-ground biomass were least sensitive since they showed increases of 18 and 6 %, respectively. The highest increments on nutrient concentration in leaves occurred when seedlings grew outdoors and were fertilized or grew under greenhouse conditions. Nitrogen concentration was 30 % higher in the outdoor plus fertilization condition compared to the outdoor without fertilization condition; phosphorus concentration was 57 % and 43 % higher, while potassium concentration was 42 and 58 % higher in the same treatments. Root growth potential was higher in the outdoor condition with 67 % in number, 53 % in length, and 35 % in dry biomass of new roots, compared to the greenhouse condition. After 120 d of being transplanted to the field, the hardening treatments showed no effect on seedling growth, except on the relative growth rate of root collar diameter ($P \leq 0.05$). The best morphological and physiological seedlings characteristics were achieved when seedlings were hardened under outdoor conditions for two months.

Index words: *Pinus engelmannii*, seedling quality, physiology, morphology, nutrients.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, en México se han impulsado programas de reforestación a gran escala. Pese a ello, los porcentajes de supervivencia aún son reducidos, lo cual se atribuye a causas diversas, entre las que sobresale la baja calidad de la planta (Mexal *et al.*, 2008; CONAFOR, 2012). Cuando se utiliza planta con atributos morfológicos y fisiológicos adecuados, aumentar las expectativas de supervivencia y establecimiento en campo (Grossnickle, 2012).

Las prácticas culturales en vivero condicionan las características funcionales de las plantas y su desempeño en campo (Davis *et al.*, 2011). La fertilización promueve el crecimiento de nuevas raíces, al mismo tiempo que mejora la capacidad de supervivencia y crecimiento inicial de las

plantas en sitios con competencia (Cuesta *et al.*, 2010). Sin embargo, los niveles altos de nitrógeno también pueden reducir la tolerancia a la sequía y la acumulación de biomasa radical en las plantas, al incrementar el área foliar, la altura de la planta y la relación biomasa aérea/biomasa radical, que las hace más vulnerables al estrés (Jackson *et al.*, 2012).

Durante el proceso de producción de planta es común el uso de malla sombra, lo que operativamente aporta beneficios al regular el ambiente de producción así como ahorro de agua (Landis, 2005; Jacobs y Landis, 2009). No obstante, existe controversia sobre su utilidad, principalmente en la fase de precondicionamiento, debido a su efecto en la calidad de planta, ya que si bien reduce el daño en el follaje por excesos de calor y alta radiación solar durante el verano, también induce respuestas morfológicas negativas en especies que requieren altos niveles de luz para crecer eficientemente (Puértolas *et al.*, 2009), al mismo tiempo que afecta las relaciones hídricas (Fini *et al.*, 2014).

La fase de precondicionamiento de las plantas, previo a su salida de vivero, es una etapa crítica en el proceso de producción, cuyo propósito es aclimatar a las plantas a condiciones adversas presentes en los sitios de plantación (Jacobs y Landis, 2009). Lo anterior se puede lograr mediante un manejo adecuado del estrés hídrico, fertilización, reducción de fotoperiodo, cambios de temperatura, exposición directa al sol, o combinaciones entre estas prácticas. La intensidad y duración del proceso de precondicionamiento depende de las condiciones del sitio y de la especie a producir (Escobar, 2012).

En muchos viveros forestales de México el precondicionamiento se realiza mediante fertilización con bajos niveles de nitrógeno, moderados de fósforo y altos de potasio, y se exponen las plantas a condiciones ambientales semejantes a las de campo, lo cual incluye exposición directa al sol o malla sombra de 60 %, y se restringen los riegos. Sin embargo, la mayoría de estas actividades son empíricas y en muchos casos basadas en experiencias de otros países, porque existen pocos trabajos documentados que aborden aspectos de precondicionamiento en especies mexicanas de clima templado frío.

Pinus engelmannii Carr. sobresale en el norte de México, en los estados de Durango y Chihuahua por su amplia distribución natural en los bosques de clima templado frío (González *et al.*, 2007), y es de las especies más empleadas en los programas de reforestación en esa región (Prieto *et al.*, 2012). En este contexto, el objetivo del presente estudio fue estudiar el efecto de cuatro condiciones ambientales (invernadero, intemperie, malla sombra y malla sombra más intemperie), más un tratamiento adicional que consistió en la condición de intemperie más fertilización, en algu-

nas características morfológicas y fisiológicas de *Pinus engelmannii* Carr. en vivero, así como su respuesta en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fase de vivero

El estudio se realizó en un vivero forestal ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México, en las coordenadas 19° 27' 37.02" N y 98° 54' 24.02" O, a 2247 m de altitud. El clima del lugar es del tipo C (Wo) (w)b(1)g, que corresponde al templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de 15 °C, precipitación media anual de 750 mm, y oscilación térmica de 5 a 7 °C (García, 1981).

Se utilizó semilla de *Pinus engelmannii* Carr. recolectada en rodales semilleros del ejido San Isidro, Municipio de Durango, Dgo. El sustrato consistió en una mezcla de 70 % de corteza de pino compostada, 10 % de turba, 10 % de agrolita y 10 % de vermiculita. Se utilizaron contenedores individuales (tubetes) de polipropileno de 220 cm³. Al momento de realizar la mezcla de sustrato se agregaron 7 kg m⁻³ de fertilizante de liberación controlada Osmocote Plus® 15N-9P-12K de nueve meses, *Trichoderma* sp. y *Basilus thuringiensis* en dosis de 5 g m⁻³ como control biológico preventivo ante plagas y enfermedades.

La semilla se remojó en agua a temperatura ambiente durante 24 h para uniformizar y acelerar la germinación, previo a la siembra, que se realizó el 21 de septiembre de 2012 con dos semillas por cavidad; la germinación ocurrió tres semanas después. Los riegos fueron diarios y ligeros desde la siembra, y para mantener el agua de riego con un pH de 6 se añadió ácido fosfórico (H₃PO₄) al 85 %. La planta permaneció en invernadero durante 7 meses (del 21 de septiembre de 2012 al 15 de mayo de 2013) hasta el inicio del precondicionamiento.

Durante la fase de desarrollo rápido se aplicó en el riego fertilizante soluble Peters Profesional Desarrollo®, formulación de 20N-20P-20K en dosis de 100 mg kg⁻¹ (*i.e.*, 100 ppm), dos veces por semana durante el último mes previo al inicio del precondicionamiento. En marzo de 2013 hubo presencia de *Fusarium*, el cual se controló con aplicaciones semanales durante un mes, de Tecto 60®, Captán® y Previcur® (2 g L⁻¹), con una mochila aspersora. Durante el precondicionamiento se registraron las variables microclimáticas de temperatura (°C), humedad relativa (%) y radiación (lux) en cada condición ambiental mediante un data logger tipo HOBO U12 (Onset® Bourne, MA.), cuyos promedios se muestran en el Cuadro 1.

Los tratamientos durante la fase de precondicionamiento se aplicaron del 15 de mayo al 15 de julio de 2013,

Cuadro 1. Valores promedio de las variables microclimáticas durante el preacondicionamiento de *Pinus engelmannii* Carr. crecido bajo diversas condiciones ambientales y fertilización.

Condición ambiental	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)			Intensidad de luz (lux)		
	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media	Máx.	Mín.	Media
Invernadero	37.5	11.5	21.2	90.3	26.6	63.6	24244.9	11.6	6847.6
Intemperie	31.2	10.6	19.0	88.1	30.9	63.2	27840.4	11.1	6288.0
Malla Sombra	27.5	11.6	17.9	67.1	35.9	53.6	13231.9	15.9	2971.9

y consistieron en exponer las plantas a cuatro condiciones ambientales: invernadero (INV), intemperie (INT), malla sombra (MS), malla sombra más intemperie (MS + INT) y un tratamiento adicional formado por intemperie más fertilización (INT + F) en el que se utilizó fertilizante soluble Peters Profesional Finalizador® 4N-25P-35K. Cada tratamiento estuvo compuesto por cuatro repeticiones de 25 plantas (100 plantas por tratamiento), para un total de 500 plantas en el experimento.

Para evaluar la condición inicial del lote de plantas, previo a la aplicación de los tratamientos se hizo un muestreo en 20 plantas a las que se les midió altura, diámetro, biomasa aérea, radical y total. Así mismo, para determinar las concentraciones iniciales de N, P y K en el follaje, se tomaron 18 acículas de cada planta, con las cuales se formaron tres muestras compuestas de 120 cada una. Una vez seleccionadas al azar las plantas para el experimento de vivero, se midió la altura y diámetro de 12 plantas en cada repetición (48 plantas por tratamiento) para tener una referencia inicial de altura y diámetro.

El 17 de julio de 2014, al final del preacondicionamiento, se hizo la evaluación morfológica de las plantas mediante un muestreo destructivo; para ello se seleccionaron en forma aleatoria 12 plantas por unidad experimental (48 por tratamiento) a las cuales se les midió el diámetro (a la base del cuello, en mm), el volumen de la raíz (cm³) y la biomasa de la parte aérea y radical (g). Debido a que *P. engelmannii* Carr. tiene hábito de crecimiento cespitoso durante las etapas iniciales (no crece en altura), no se consideró medir la altura de las plantas en la evaluación morfológica.

El volumen de la raíz se determinó con base en el principio de Arquímedes (Harrington *et al.*, 1994), con una balanza analítica y un vaso de precipitado con agua. Al sumergir las raíces en el agua, sin tocar las paredes del vaso, se registra un aumento de peso (g), que equivale al volumen de la raíz en cm³. Para evaluar la biomasa de las plantas, se separó la parte aérea de la raíz, y esta última se lavó cuidadosamente para retirar el sustrato adherido. Una vez obtenidas las muestras se colocaron en bolsas de papel por separado en una estufa a 70 °C durante 72 h, hasta obtener peso constante. Finalmente, se pesaron por separado en

una balanza analítica Ohaus® con precisión de 1 mg. Con las variables anteriores se determinó la relación parte aérea/raíz, como el cociente entre el peso seco aéreo y el peso seco radical (Ritchie *et al.*, 2010).

La evaluación fisiológica consistió en determinar el potencial de crecimiento de la raíz (PCR) con la metodología propuesta por Ritchie *et al.* (2010). Se seleccionaron cinco plantas por unidad experimental (20 plantas por tratamiento), a las cuales se les midió el diámetro (en la base del cuello en mm) y se les retiró el sustrato adherido; además, se contó el número de raíces nuevas con la finalidad de conocer el estado inicial de la planta. Posteriormente se colocaron en macetas de plástico de 7 L de capacidad. El sustrato estuvo compuesto por 70 % de corteza de pino compostada, 10 % de turba, 10 % de agrolita, y 10 % de vermiculita. Las macetas con las plantas se colocaron en condiciones óptimas de temperatura, humedad y luminosidad para favorecer el crecimiento de nuevas raíces. Después de 28 d se realizó la evaluación del PCR, que consistió en retirar el sustrato de la raíz y contar en cada planta el número de raíces nuevas mayores a 1 cm (n) y la longitud de cada una (cm). Así mismo se evaluó la biomasa de raíces nuevas (g).

Para obtener la concentración de N, P y K en el follaje de las plantas, se seleccionó una muestra compuesta por 120 acículas por cada unidad experimental y se registró su peso seco (g). Los análisis foliares se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Tejidos Vegetales del Colegio de Postgraduados, en donde la determinación de nitrógeno se hizo con el método micro-kjeldahl, mientras que los de fósforo y potasio se hicieron con el proceso de digestión húmeda. Con los valores de peso seco de las muestras foliares (g) y la concentración (%) se calculó el contenido neto de nutrimentos para cada muestra.

Fase de plantación

El 19 de julio de 2013 se seleccionaron al azar ocho plantas por unidad experimental (16 plantas por tratamiento) a las cuales se les midió el diámetro (mm) como medida inicial antes de la plantación. Las plantas se establecieron en una cama de crecimiento de 10 m de largo por 1.5 m de ancho y 0.8 m de altura. Se utilizó suelo agrícola con

una profundidad del perfil de 60 cm aproximadamente. Las plantas se distribuyeron en un diseño de bloques completos al azar, en parcelas de cuatro plantas por tratamiento en cuatro bloques. A los 120 d después del trasplante se extrajeron las plantas de la cama de crecimiento, evitando en lo posible la pérdida de raíces. Las plantas extraídas se lavaron y se les determinó el diámetro a la base (mm), la longitud de la raíz más larga (cm), el número de raíces de primer orden, el volumen de raíz (cm³), la biomasa aérea, radical y total (g) después de secarlas en estufa por 72 h a 70 °C. Con los valores iniciales de diámetro se calculó el incremento en esta variable y la tasa relativa de crecimiento (Kramer y Kozlowsky, 1979).

Diseño experimental y análisis estadístico

En el experimento de vivero se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. En el caso de la plantación en las camas de crecimiento se utilizó un diseño en bloques completos al azar. Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza mediante el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS 9.0® (SAS Institute, 2002). Cuando hubo diferencias significativas entre tratamientos se aplicaron pruebas de comparación de medias de Tukey (P ≤ 0.05). Previo a ello se validaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Shapiro-Wilks y de Levene. Cuando no se cumplió alguno de estos supuestos, los datos se transformaron mediante logaritmos naturales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Atributos morfológicos

Las condiciones ambientales en la fase de acondicionamiento afectaron las características morfológicas de las

plantas (P ≤ 0.05) al final de la etapa de vivero (Cuadro 2). Los mejores resultados se obtuvieron cuando las plantas permanecieron en condiciones de intemperie, con o sin fertilización. Los incrementos en diámetro y acumulación de biomasa en la parte aérea fueron de 18 y 6 %, respectivamente, en comparación con las plantas que se mantuvieron en invernadero. El efecto más evidente fue sobre la biomasa radical que resultó 38 % mayor con respecto a las plantas que crecieron en invernadero, seguida por la biomasa total con 32 % y el volumen de raíz con 30 %. Las plantas expuestas al tratamiento de intemperie presentaron un mejor balance entre la parte aérea y la radical al presentar el valor menor (3.00), 28 % menos que el valor más alto (3.84) registrado en las condiciones de invernadero. También Luis *et al.* (2010) encontraron un equilibrio mejor entre la parte de transpiración y de absorción de agua y nutrientes, en *Pinus canariensis* Chr. Sm. Ex DC., cuando se cultivó a pleno sol en comparación con las que crecieron bajo malla sombra; tal equilibrio es favorable cuando se planta en sitios con poca humedad.

Las respuestas morfológicas en condiciones de intemperie se atribuye a que las plantas redujeron su crecimiento en altura pero incrementaron el diámetro y la biomasa aérea, además de haber promovido el crecimiento radical, posiblemente debido a que en intemperie hubo más pérdida de humedad en el sustrato que generó niveles moderados de estrés, que promovieron el crecimiento de la raíz.

Sin embargo, las plantas crecidas en invernadero acumularon una biomasa total similar a las que crecieron a la intemperie, quizá debido a que en invernadero las plantas pudieron tener un crecimiento continuo.

En sustratos orgánicos como el utilizado en este estudio se promueve la actividad microbiana y se liberan iones de

Cuadro 2. Valores promedio y significancia estadística para las variables diámetro, biomasa, volumen radical (VR) y relación parte aérea/parte radical (RPAR) de *Pinus engelmannii* Carr. crecido bajo diversas condiciones ambientales y fertilización aplicados durante el preacondicionamiento.

Tratamiento	Diámetro (mm)	Biomasa (g)			VR (cm ³)	RPAR
		Aérea	Radical	Total		
INV	5.17 ± 0.17 b	3.60 ± 0.24 ab	1.00 ± 0.08 b	4.58 ± 0.32 ab	3.64 ± 0.28 c	3.72 ± 0.13 a
INT	6.09 ± 0.06 a	3.82 ± 0.06 a	1.32 ± 0.02 a	5.14 ± 0.05 a	4.75 ± 0.19 a	3.00 ± 0.10 b
MS	5.29 ± 0.06 b	2.99 ± 0.15 c	0.97 ± 0.04 b	3.94 ± 0.17 b	3.30 ± 0.14 c	3.15 ± 0.17 ab
MS + INT	5.59 ± 0.05 ab	3.10 ± 0.07 bc	0.96 ± 0.05 b	4.06 ± 0.11 b	3.74 ± 0.34 bc	3.40 ± 0.19 ab
INT + F	5.93 ± 0.18 a	3.63 ± 0.07 ab	1.19 ± 0.05ab	4.82 ± 0.05 a	4.68 ± 0.13 ab	3.18 ± 0.19 ab
(P > F)	0.0003	0.0022	0.0007	0.0008	0.0012	0.0500

INV = invernadero; INT = intemperie; MS = malla sombra; MS + INT = malla sombra más intemperie (un mes en cada condición); INT + F = intemperie + fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

nitrógeno que son asimilados por las plantas y transformados en biomasa aérea (López y Estañol, 2007). El tratamiento de fertilización no modificó el crecimiento aéreo y radical de las plantas con respecto a las de intemperie sin fertilización, a pesar de que se encontró mayor concentración de todos los nutrientes en las plantas fertilizadas. Tal falta de respuesta en crecimiento a la fertilización puede deberse a la tasa de crecimiento reducida de la especie o al efecto de otro factor limitativo. La disminución del crecimiento en algunas especies de coníferas se relaciona con baja disponibilidad de nutrientes, aunque éstos pueden favorecer el crecimiento del sistema radical (Landis y van Steenis, 2005; Navarro *et al.*, 2013).

Los resultados de este estudio concuerdan con Puértolas *et al.* (2009), quienes encontraron mejor calidad de planta en *Pinus halepensis* Mill. y *Quercus ilex* Lam., cuando se produjo bajo sombra moderada y a sol directo. También Barnnet (1989) encontró mejores incrementos en diámetro y biomasa subterránea en *Pinus palustris* Mill. y *P. taeda* L, cuando las plantas crecieron a sol directo que cuando se cubrieron con malla sombra. Así mismo, Khan *et al.* (2000) encontraron que conforme disminuyen los niveles de sombra de 75 al 0 % (sol directo) aumentó la calidad morfológica de las plantas en cuatro especies de coníferas del noroeste de Estados Unidos. En cambio, en plantas de *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser, Santelices *et al.* (2013) registraron mayor crecimiento en diámetro y biomasa radical cuando fueron crecidas con sombra de 35 y 18 %.

Atributos fisiológicos

Las condiciones ambientales durante el precondicionamiento afectaron la concentración y el contenido de N, P y K en el follaje de las plantas ($P \leq 0.05$). Los niveles menores se encontraron en plantas crecidas a la intemperie, y los niveles mayores se obtuvieron cuando las plantas perma-

necieron en invernadero o en intemperie más fertilización, ambas con resultados similares. El contenido de nutrientes siguió una tendencia similar al de las concentraciones (Cuadro 3).

Las plantas que crecieron a la intemperie con fertilización tuvieron una concentración de nitrógeno 30 % mayor que las de intemperie y sin fertilización. El fósforo mostró una concentración 57 y 43 % mayor en invernadero e intemperie más fertilización, con respecto al de intemperie sin fertilización. Finalmente, la concentración de potasio fue mayor 58 y 42 % en los tratamientos de invernadero e intemperie más fertilización, con relación al tratamiento de intemperie sin fertilizar. Las mayores concentraciones de N, P y K en las plantas que crecieron en la condición de intemperie más fertilización se debieron principalmente al suministro de estos nutrientes durante el precondicionamiento.

Sin embargo, las plantas que permanecieron en invernadero presentaron concentraciones similares a las plantas fertilizadas, lo cual puede deberse a que las condiciones ambientales del invernadero (Cuadro 1) tuvieron mayor temperatura. Al respecto, Rose *et al.* (2004) señalaron que el calor y la humedad aumentan la liberación de nutrientes por el fertilizante de liberación controlada cuya duración es de nueve meses. Así mismo, en invernadero se propicia la descomposición de materia orgánica y, por ende, la liberación de nutrientes adicionales disponibles para las plantas.

Solo el fósforo del follaje registrado en las condiciones de intemperie más fertilización e invernadero y el potasio en el tratamiento de invernadero, alcanzaron los niveles recomendados por Landis (1989) para especies de coníferas producidas en contenedor. Sin embargo, no existe información sobre los niveles óptimos de concentraciones de N, P y K en el follaje para especies como *Pinus engelmannii* Carr., por lo que los niveles óptimos pueden variar.

Cuadro 3. Promedios y significancias estadísticas en la concentración y contenido de N, P y K en el follaje de *Pinus engelmannii* Carr. crecido bajo diversas condiciones ambientales y fertilización aplicados durante el precondicionamiento.

Tratamiento	Concentración (mg g ⁻¹)			Contenido (mg)		
	N	P	K	N	P	K
INV	12.5 ± 0.02 ab	2.2 ± 0.07 a	4.1 ± 0.25 a	4.69 ± 0.31 b	0.84 ± 0.04 a	1.54 ± 0.07 a
INT	10.3 ± 0.01 d	1.4 ± 0.15 c	2.6 ± 0.22 b	4.20 ± 0.10 b	0.60 ± 0.07 b	1.08 ± 0.10 b
MS	11.7 ± 0.01 bc	1.5 ± 0.20 bc	3.2 ± 0.46 ab	4.56 ± 0.51 b	0.58 ± 0.02 b	1.22 ± 0.05 b
MS + INT	11.0 ± 0.03 cd	1.7 ± 0.04 bc	2.9 ± 0.05 b	4.19 ± 0.21 b	0.63 ± 0.02 b	1.11 ± 0.04 b
INT + F	13.4 ± 0.02 a	2.0 ± 0.04 ab	3.7 ± 0.07 ab	6.17 ± 0.13 a	0.94 ± 0.02 a	1.70 ± 0.04 a
(P > F)	< 0.0001	0.0036	0.0143	0.0039	< 0.0001	0.0002

INV = invernadero; INT = intemperie; MS = malla sombra; MS + INT = malla sombra + intemperie; INT + F = intemperie + fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuando el preacondicionamiento se realiza por nutrición, es usual disminuir la dosis de nitrógeno para frenar el crecimiento en altura de la planta, e incrementar ligeramente la dosis de fósforo y drásticamente la de potasio para promover el crecimiento de raíz y la función osmótica en las hojas, respectivamente. No obstante, en el tratamiento de fertilización en este estudio las mayores diferencias entre la condición de invernadero e intemperie (sin fertilizante) se tuvieron en el contenido de N, y no en P o K. La disminución de riegos induce estrés hídrico, promueve la acumulación de reservas, reduce la capacidad transpiracional y promueve la lignificación del tallo, por lo que la planta incrementa su tolerancia ante estrés hídrico, térmico, nutricional y mecánico (Vilagrosa *et al.*, 2006).

Las condiciones ambientales en la fase de preacondicionamiento modificaron el potencial de crecimiento radical de las plantas, expresado en número de raíces nuevas, longitud y biomasa de las mismas ($P \leq 0.05$). En general, los valores más altos de PCR se encontraron en las plantas que crecieron al menos un mes a la intemperie, con o sin fertilización. En la condición de intemperie las plantas tuvieron 67 % más raíces, 53 % mayor longitud y 35 % más biomasa de raíces nuevas con respecto a las del tratamiento de invernadero (Cuadro 4).

Los respuestas en PCR pueden atribuirse a diversos factores, principalmente a los niveles moderados de estrés hídrico al que estuvieron sometidas las plantas crecidas a la intemperie, ya que en estas condiciones recibieron altos niveles de luminosidad, lo que debió haber promovido la acumulación de carbohidratos en las hojas y tallos que luego se retraslocan a la raíz, como lo mostró Pallardy (2008).

Coopman *et al.* (2008) encontraron resultados similares cuando preacondicionaron plantas de *Eucalyptus globulus* Labill. con niveles moderados de estrés hídrico. En cambio, Villar-Salvador *et al.* (2004) observaron lo contrario cuan-

do aplicaron diferentes niveles de estrés en *Quercus ilex* Lam., ya que el mayor valor de biomasa de raíces nuevas ocurrió cuando la planta no sufrió estrés durante el preacondicionamiento.

En muchos casos el PCR se ha utilizado como predictor del desempeño de las plantas en campo, cuando la absorción de agua depende del crecimiento de raíces nuevas (Davis y Jacobs, 2005). Las plantas con mayor capacidad para generar raíces nuevas incrementan sus posibilidades de supervivencia en campo (Haase, 2011); también Oliet *et al.* (2003) encontraron mayor supervivencia de *Pinus halepensis* Mill. cuando incrementó su capacidad para generar raíces nuevas. En sitios de fertilidad alta y baja, Del Campo *et al.* (2007) encontraron una fuerte relación entre el PCR y la supervivencia en la misma especie.

Evaluación de respuesta al trasplante

Después de 120 d del trasplante no se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el crecimiento de las plantas por efecto de los tratamientos aplicados en el preacondicionamiento, excepto en la tasa relativa de crecimiento en diámetro (Cuadro 5). La ausencia de efecto de los tratamientos puede atribuirse a que durante el desarrollo de la prueba no se presentaron condiciones climatológicas adversas, ya que durante los cuatro meses de evaluación las lluvias en el lugar fueron recurrentes, de modo que la precipitación recibida fue mayor que la que ocurre en los sitios de distribución natural de la especie, y las temperaturas también fueron favorables. Es decir, no hubo incidencia de sequía ni de heladas que indujeran a la planta a expresar sus mecanismos de resistencia al estrés.

En esta especie la tasa de crecimiento es reducida en la etapa de desarrollo estudiada, y las plantas no superaron el estado cespitoso; esta es una característica inherente de algunas especies como *Pinus engelmannii* Carr. ya que se

Cuadro 4. Promedios y significancias estadísticas del potencial de crecimiento radical de *Pinus engelmannii* Carr., en respuesta a cinco condiciones ambientales durante el preacondicionamiento.

Tratamiento	Raíces nuevas [†] (n)	Longitud (m)	Biomasa seca (g)
INV	43.80 ± 2.56 c	1.68 ± 0.12 c	0.17 ± 0.01 b
INT	73.20 ± 5.43 a	2.57 ± 0.22 a	0.22 ± 0.02 ab
MS	47.94 ± 3.03 bc	1.87 ± 0.10 bc	0.16 ± 0.01 b
MS + INT	60.85 ± 4.38 ab	2.21 ± 0.15 abc	0.19 ± 0.01ab
INT + F	67.00 ± 2.02 a	2.33 ± 0.09 ab	0.24 ± 0.02 a
(P > F)	0.0002	0.0046	0.0075

INV = invernadero; INT = intemperie; MS = malla sombra; MS + INT = malla sombra + intemperie; INT + F = intemperie + fertilización. [†]Raíces mayores a 1 cm de longitud. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

Cuadro 5. Promedios y significancias estadísticas para las variables diámetro final (DF), biomasa aérea (BA), biomasa radical (BR) y biomasa total (BT), volumen de raíz (VR), longitud de raíz (LR), número de raíces primarias (NRP), tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD) e incremento en diámetro (ID), de *Pinus engelmannii* Carr. después de 120 d de establecidas.

Tratamiento	DF (mm)	BA (g)	BR (g)	BT (g)	VR (cm ³)	LR (cm)	NRP (n)	TRCD (mm mes ⁻¹)	ID (mm)
INV	13.95	9.30	5.46	14.77	23.83	51.34	14.06	0.21 ab	8.00
INT	13.41	9.33	5.03	14.06	23.08	50.81	14.50	0.19 ab	7.01
MS	13.51	9.73	4.48	14.21	20.31	49.81	12.81	0.22 a	7.90
MS + INT	12.61	8.84	5.40	14.25	21.27	51.50	14.00	0.19 ab	6.70
INT + F	13.10	8.95	5.25	14.20	22.05	53.00	14.43	0.17 b	6.51
(P > F)	0.69	0.92	0.40	0.98	0.89	0.40	0.50	0.02	0.23

INV = invernadero; INT = intemperie; MS = malla sombra; MS + INT = malla sombra + intemperie; INT + F = intemperie + fertilización. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05).

suprime el crecimiento en altura durante los primeros años (Nelson *et al.*, 2003). Aunque se esperaba un mayor efecto en las variables relacionadas al crecimiento de la raíz, en su longitud total no se expresó probablemente porque las raíces estuvieron confinadas a la profundidad del suelo en las camas de crecimiento.

CONCLUSIONES

Las condiciones ambientales aplicadas durante el preacondicionamiento en vivero influyeron en los atributos morfológicos y fisiológicos de calidad de planta en *Pinus engelmannii*. La mejor calidad se obtuvo cuando las plantas se expusieron a la intemperie durante dos meses antes de ser llevadas al sitio de plantación. El potencial de crecimiento de raíces nuevas se incrementó en los árboles que se expusieron a la intemperie. La concentración de nutrientes en el follaje de las plantas estuvo influenciada por las condiciones ambientales y la fertilización. Pero las condiciones ambientales del preacondicionamiento no afectaron la respuesta de *P. engelmannii* después del trasplante a campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Barnnet J. P. (1989) Shading reduces growth of longleaf and loblolly pine seedlings in containers. *Tree Planters' Notes* 40:23-26.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2012) Evaluación complementaria del Programa de Conservación y Restauración de Ecosistemas Forestales (PROCOREF) ejercicio fiscal 2011. Zapopan, Jalisco, México. 276 p.
- Coopman R. R., J. C. Jara, L. A. Bravo, K. L. Sáenz, G. R. Mella and R. Escobar (2008) Changes in morpho-physiological attributes of *Eucalyptus globulus* plants in response to different drought hardening treatments. *Electronic Journal of Biotechnology* 11:2-10.
- Cuesta B., P. Villar-Salvador, J. Puértolas, D. F. Jacobs and J. M. Rey-Benayas (2010) Why do large, nitrogen rich seedlings better resist stressful transplanting conditions? A physiological analysis in two functionally contrasting Mediterranean forest species. *Forest Ecology and Management* 260:71-78.
- Davis A. S. and D. F. Jacobs (2005) Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests* 30:295-311.
- Davis A. S., A. L. Ross-Davis and R. K. Dumroese (2011) Nursery culture impacts cold hardiness in longleaf pine (*Pinus palustris*) seedlings. *Restoration Ecology* 19:717-719.
- Del Campo A. D., R. M. Navarro-Cerrillo, J. Hermoso and A. J. Ibáñez (2007) Relationship between root growth potential and field performance in Aleppo pine. *Annals of Forest Science* 64:541-548.
- Escobar R. (2012) Fases de cultivo: Endurecimiento. In: Producción de Plantas en Viveros Forestales. G. L. Buamscha, T. Contard, R. K. Dumroese, J. A. Enricci, R. Escobar, H. E. Gonda, D. F. Jacobs, T. D. Landis, T. Luna, J. G. Mexal y K. M. Wilkinson (eds.). Colección Nexos. Consejo Federal de Inversiones. Buenos Aires, Argentina. pp:142-162.
- Fini A., F. Ferrini, Di Ferdinando, C. Brunetti, C. Jiordano, F. Gerini and M. Tattini (2014) Acclimation to partial shading or full sunlight determines the performance of container-growing *Fraxinus ornus* to subsequent drought stress. *Urban Forestry & Urban Greening* 13:63-70.
- García E. (1981) Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. 3a ed. Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 252 p.
- González E. M. S., M. González E. y M. A. Márquez L. (2007) Vegetación y Ecorregiones de Durango. IPN-CIIDIR. Durango, México. 219 p.
- Grossnickle S. C. (2012) Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43:711-738.
- Haase D. L. (2011) Seedling root targets. In: National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. L. E. Riley, D. L. Haase, J. R. Pinto (eds.). RMRS-P-65. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. pp:80-82.
- Harrington J. T., J. G. Mexal and J. Fisher (1994) Volume displacement provides a quick and accurate way to quantify new root production. *Tree Planters' Notes* 45:121-124.
- Jacobs D. F. and T. D. Landis (2009) Hardening. In: Nursery Manual for Native Plants: A Guide for Tribal Nurseries Volume 1: Nursery Management. R. K. Dumroese, T. Luna and T. D. Landis (eds.). Agric. Handbook 730. USDA, Forest Service. Washington, D.C. pp:217-227.
- Jackson P. D., R. K. Dumroese and J. P. Barnett (2012) Nursery response of container *Pinus palustris* seedling to nitrogen supply and subsequent effects on outplanting performance. *Forest Ecology and Management* 265:1-12.
- Khan S. R., R. Rose, D. L. Haase and T. E. Sabin (2000) Effects of shade on morphology, chlorophyll concentration, and chlorophyll fluorescence of four Pacific Northwest conifer species. *New Forests* 19:171-186.
- Kramer P. J. and T. T. Kozlowsky (1979) Physiology of Woody Plants. Academic Press, New York. 811 p.
- Landis T. D. (1989) Mineral nutrients and fertilization. In: The Container Tree Nursery Manual, Vol. 4: Seedling Nutrition and Irrigation. T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald, and J. P. Barnett (eds.). Agric. Handbook 674. USDA, Forest Service, Washington, DC. pp:1-67.
- Landis T. D. (2005) Cooling with shade. In: Forest Nursery Notes. R.

- K. Dumroese, T. D. Landis and R. Watson (eds.). R6-CP-TP-06-2005. USDA. Forest Service. Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs. Portland, OR. pp:20-23.
- Landis T. D. and E. van Steenis (2005)** Macronutrients-Phosphorus. In: Forest Nursery Notes. R. K. Dumroese T. D. Landis, D. Steinfeld and R. Watson (eds.). R6-CP-TP-07-04. USDA. Forest Service. Pacific Northwest Region, State and Private Forestry, Cooperative Programs. Portland, OR. pp:6-14.
- López L. M. A. y E. Estañol B. (2007)** Detección de deficiencias de hierro en *Pinus leiophylla* a partir de los efectos de dilución y concentración nutrimental. *Terra Latinoamericana* 25:9-15.
- Luis V. C., M. Llorca, E. Chirino, E. I. Hernández and A. Vilagrosa (2010)** Differences in morphology, gas exchange and root hydraulic conductance before planting in seedlings growing under different fertilization and light regimes. *Trees* 24:1143-150.
- Mexal J. G., R. A. Cuevas R. and T. D. Landis (2008)** Reforestation success in central Mexico: factors determining survival and early growth. *Tree Planters' Notes* 53:16-22.
- Navarro S. J. L., J. J. Vargas H., A. Gómez G., L. del M. Ruiz P. y P. Sánchez G. (2013)** Morfología, biomasa y contenido nutrimental en *Abies religiosa* con diferentes regímenes de fertilización en vivero. *Agrociencia* 47:707-721.
- Nelson C. D., C. Weng, T. Kubisiak, M. Stine and C L Brown (2003)** On the number of genes controlling the grass stage in long leaf pine. *Journal of Heredity* 94:392-398.
- Oliet J., R. Planelles, F. Artero, E. Martínez M., L. Álvarez L., R. Alejano y M. López A. (2003)** El potencial de crecimiento radical en planta de vivero de *Pinus halepensis* Mill. Influencia de la fertilización. Investigación Agraria: *Sistemas y Recursos Forestales* 12:51-60.
- Pallardy E. G. (2008)** Physiology of Woody Plants. 3rd ed. Academic Press. San Diego, CA. 635 p.
- Prieto R. J. A., R. J. Almaraz R., J. J. Corral R. y A. Días V. (2012)** Efecto del estrés hídrico en *Pinus cooperi* Blanco durante su preacondicionamiento en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12:20-28.
- Puértolas J. L., F. Benito and J. L. Peñuelas (2009)** Effects of nursery shading on seedling quality and post-planting performance in two Mediterranean species with contrasting shade tolerance. *New Forests* 38:295-308.
- Ritchie G. A., T. D. Landis, K. Dumroese and D. L. Haase. (2010)** Assessing Plant Quality. In: The Container Tree Nursery Manual. Vol. 7, Seedling Processing, Storage, and Outplanting. T. D. Landis, R. K. Dumroese, and D. L. Haase (eds.). Agric. Handbook. 674. USDA. Forest Service. Washington, DC. USA. pp:2-15.
- Rose R., D. L. Haase y E. Arellano (2004)** Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque* 25:89-100.
- Santelices R., S. Espinoza, A. Cabrera A., K. Peña-Rojas and R. Donoso (2013)**. Effect of shading and fertilization on the development of container-grown *Nothofagus glauca* seedlings, a threatened species from central Chile. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 75:145-148.
- SAS Institute (2002)** Statistical Analysis System. SAS/STAT Computer Software. Release 9.00. SAS Institute Inc. Cary, N.C. 5121 p.
- Vilagrosa A. P., Villar-Salvador y J. Puértolas (2006)** El endurecimiento en vivero de especies forestales mediterráneas. In: Calidad de Planta Forestal para la Restauración de Ambientes Mediterráneos. Estado Actual de Conocimientos. J. Cortina, J. L. Peñuelas, J. Puértolas, R. Savé y A. Vilagrosa (eds.). Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, España. pp:11-30.
- Villar-Salvador P., R. Planelles, J. Oliet, J. L. Peñuelas-Rúbira, D. F. Jacobs and M. González (2004)** Drought tolerance and transplanting performance of olm oak (*Quercus ilex*) seedlings after drought hardening in the nursery. *Tree Physiology* 24:1147-1155.