

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 Growth and Efficiency in the Use of Nutrients of *Pinus cooperi* C. E. Blanco Seedlings Produced in Nurseries with a Controlled Release Fertilizer

Laura Elena Martínez-Nevárez¹ , José Ángel Prieto-Ruiz^{2*} , José Ángel Sigala-Rodríguez³ ,
José Leonardo García-Rodríguez³ , Magdalena Martínez-Reyes⁴ ,
Artemio Carrillo-Parra⁵ y Pedro Antonio Domínguez-Calleros²

¹ Universidad Juárez del Estado de Durango, Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, ² Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Av. Río Papaloapan y Blvd. Durango, s/n, Col. Valle del Sur. 34120 Durango, Durango, México; (L.E.M.N.), (J.A.P.R.), (P.A.D.C.).

* Autor para correspondencia: jprieto@ujed.mx

³ Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango-El Mezquital, km 4.5. 34170 Durango, Durango, México; (J.A.S.R.), (J.L.G.R.).

⁴ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México; (M.M.R.).

⁵ Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Av. Veterinaria No. 501, esquina con Blvd. del Guadiana. 34120 Durango, Durango, México; (A.C.P.).

RESUMEN

La fertilización es una de las actividades más importantes y costosas en la producción de plantas forestales en contenedor. La aplicación de fertilizantes de liberación controlada (FLC) permite disminuir costos, al ser incorporados en el sustrato en un sólo evento. Sin embargo, es necesario definir la dosis óptima con base a las necesidades nutricionales de cada especie. El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de tres dosis de FLC en el crecimiento morfológico y en la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN) en plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco en vivero. Como fertilizante se utilizó Multicote 8* [18-6-12 de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K)] en tres dosis: 4, 6 y 8 g L⁻¹ de sustrato. A las 49 semanas de cultivo se evaluó el diámetro en la base del tallo, la altura, el peso seco aéreo y de la raíz, y su relación. Se realizó un análisis foliar de N, P y K para determinar el estado nutricional de las plantas mediante análisis de vectores y EUN. Los tratamientos se analizaron bajo un diseño completamente al azar con análisis de varianzas (ANOVA) y pruebas de medias de Tukey. Los individuos fertilizados con dosis de 6 y 8 g L⁻¹ tuvieron mejores atributos morfológicos. La relación de peso seco aéreo / peso seco radicular se mantuvo en los valores deseables en todos los tratamientos. El contenido de N, P y K fue superior con las dosis de 6 y 8 g L⁻¹, aunque la EUN se incrementó a medida que la dosis de FLC fue menor. Los nomogramas de vectores indican que una dosis alta no tiene un efecto en el crecimiento, incluso puede existir toxicidad por fertilización excesiva. Se concluye que la dosis de 6 g L⁻¹ de FLC favorece el crecimiento y nutrición de *P. cooperi* en vivero.

Palabras clave: calidad de planta forestal, dosis de fertilización, estado nutricional.

SUMMARY

Fertilization is one of the most important and costly activities in forested plant production in container. The application of controlled release fertilizers (CRF) allows reducing costs since they are incorporated in the substrate in a single event. However, the optimum dosage should be defined based on the nutritional needs of each species. Thus, the objective of the present study is to determine the effect of three CRF doses on morphological growth and in nitrogen use efficiency (NUE) in *Pinus cooperi* C. E. Blanco plants in the nursery. Multicote 8* [18-6-12 of nitrogen (N),



Cita recomendada:

Martínez-Nevárez, L. E., Prieto-Ruiz, J. A., Sigala-Rodríguez, J. A., García-Rodríguez, J. L., Martínez-Reyes, M., Carrillo-Parra, A., & 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. e1707. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1707>

Recibido: 24 de marzo de 2023.
Aceptado: 22 de mayo de 2023.
Artículo. Volumen 41.
Septiembre de 2023.

Editor de Sección:
Dr. Fidel Núñez-Ramírez
Editor Técnico:
Dr. Benjamín Zamudio González



Copyright: © 2023 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

phosphorus (P), and potassium (K)] was used as fertilizer in three doses: 4, 6 and 8 g L⁻¹ of substrate. At 49 weeks after sowing, the following evaluations were performed: stem base diameter, height, aerial and root dry weight and their relationship. A leaf analysis of N, P and K was performed to determine the nutritional status of the plants by a vector analysis and estimate the NUE. The treatments were analyzed under a completely randomized design with an analysis of variance (ANOVA) and Tukey's means test. The individuals fertilized with the 6 and 8 g L⁻¹ dosage had better morphological attributes. The shoot-to-root ratio maintained the desirable values in all the treatments. The N, P, and K contents were higher with the 6 and 8 g L⁻¹ doses, although NUE increased as the CRF dose decreased. The vector nomograms indicated that a high dosage does not have the effect on growth, actually toxicity may exist due to excessive fertilization. In conclusion, the 6 g L⁻¹ CRF dose favors *P. cooperi* growth and nutrition in the nursery.

Index words: forested plant quality, fertilization dosage, nutrimental status.

INTRODUCCIÓN

La producción de plantas forestales es importante en los procesos de reforestación y restauración de ecosistemas forestales (Andivia *et al.*, 2021), y su calidad es uno de los factores más significativos en la supervivencia y crecimiento inicial después del establecimiento de plantaciones forestales (Robles-Villanueva, Rodríguez y Villanueva, 2017; Grossnickle y MacDonald, 2018). Las características morfológicas de los individuos producidos dependen del origen y calidad del material genético, así como de las prácticas de cultivo en vivero (Davis y Jacobs, 2005). En este contexto, la fertilización desempeña funciones esenciales en la producción de planta forestal, dado que con esta práctica se suministran los nutrientes minerales necesarios para su crecimiento y, generalmente, están asociados con el desempeño de la planta en campo (Uscola, Villar, Gross y Maillard, 2015; Villar-Salvador, Uscola y Jacobs, 2015).

Mediante la aplicación de fertilizantes de liberación controlada se suministran los nutrimentos de forma paulatina durante un periodo de tiempo determinado y su liberación es mejor cuando la humedad aprovechable en el sustrato es mayor a 50% y la temperatura ambiental fluctúa entre 20 y 28 °C (Rose, Haase y Arellano, 2004). La aplicación de FLC es fácil debido a que se incorpora por única vez durante la preparación del sustrato. Lo anterior permite reducir costos de mano de obra con relación a la fertilización periódica aplicada en los riegos. Además, se reduce la pérdida de nutrientes por lixiviación durante el riego (Rose *et al.*, 2004), con ello se aminora el riesgo de contaminación de mantos acuíferos y se minimizan riesgos de toxicidad por sobredosis (Alzugaray, Haase y Rose, 2004).

Diversos estudios han probado que los FLC son una alternativa eficaz en la nutrición de especies forestales en vivero. En especies del género *Pinus* se han analizado dosis (Oliet, Planelles, Segura, Artero y Jacobs, 2004; Oliet *et al.*, 2009), tipo de recubrimiento del fertilizante (Fu, Oliet, Li y Wang, 2017), proporciones de N, P y K (González *et al.*, 2018), combinación con fertilizantes hidrosolubles (Bautista-Ojeda *et al.*, 2018) e interacciones de las dosis de fertilización con mezclas de sustratos (Aguilera-Rodríguez, Aldrete, Martínez y Ordaz, 2016; Madrid-Aispuro *et al.*, 2020a). Las respuestas de las plantas a la aplicación de FLC pueden variar, debido a que la asimilación y necesidades de nutrientes es diferente en cada especie (Bustos *et al.*, 2008). Por tal motivo, es necesario conocer las concentraciones de nutrientes requeridas para cada especie producida en los viveros forestales (Juárez-Mirón, López y Estañol, 2021).

En México, durante los últimos 10 años diversos trabajos han probado el uso de FLC en la producción de plantas en vivero del género *Pinus* usando distintas dosis, de 6 a 10 g L⁻¹ (Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2016; Castro-Garibay, Aldrete, López y Ordaz, 2019; Vicente-Arbona, Carrasco, Rodríguez y Villanueva, 2019; Salcido-Ruiz, Prieto, García, Santana y Chávez, 2020). En otros estudios, se ha observado que dosis de 3 a 4 g L⁻¹ complementadas con fertilizantes hidrosolubles producen planta con parámetros morfológicos de calidad (Madrid-Aispuro *et al.*, 2020b; Aguilera-Rodríguez, Aldrete, Trejo y Ordaz, 2021; Salcido-Ruiz, Prieto, García, Santana y Chávez, 2021). Sin embargo, existe controversia sobre la dosis máxima de FLC, ya que es posible que con dosis altas se esté sobre fertilizando, lo que puede ocasionar toxicidad con la consecuente reducción en el crecimiento por exceso de sales (Salifu y Timmer, 2003; Jacobs y Timmer, 2005).

Algunos estudios demuestran la posibilidad de usar dosis bajas de fertilización, con las cuales se obtienen individuos con características similares a las obtenidas con dosis altas (Madrid-Aispuro *et al.*, 2020b; Salcido-Ruíz *et al.*, 2021). Además, se cumplen los parámetros de calidad establecidos por la NMX-AA-170-SCFI-2016 para la Certificación de la Operación de Viveros Forestales (Secretaría de Economía, 2016). En este sentido, es necesario explorar a fondo las cualidades morfológicas de los individuos producidos y su relación con la eficiencia en el uso de nutrientes a través de un análisis del estado nutrimental, contrastando dosis deficitarias y las que induzcan el consumo de lujo y toxicidad por exceso de fertilizante (Fu *et al.*, 2017).

Pinus cooperi C.E. Blanco es endémico de la Sierra Madre Occidental; se distribuye naturalmente desde el centro-oeste del estado de Chihuahua hasta el sur del estado de Durango y noreste de Nayarit (García y González, 2003; González-Elizondo, González, Tena, Ruacho y López, 2012). Es una de las principales especies con aprovechamiento forestal en el estado de Durango, debido a su amplia abundancia y distribución, alto valor de la producción maderable debido a sus favorables propiedades tecnológicas de la madera y tener fustes largos limpios para diversos usos, entre otros, madera aserrada (Figura 1), (Cruz-Cobos, De los Santos-Posadas y Valdez, 2008; Béjar-Pulido *et al.*, 2018).

Al ser una especie de interés, es necesario estudiar diferentes aspectos de su cultivo en vivero para incrementar el éxito de las reforestaciones con fines de restauración y propósitos comerciales en su área de distribución. Por lo que el objetivo del estudio fue determinar el efecto de tres dosis de un fertilizante de liberación controlada, con 18-6-12 de N, P y K, en el crecimiento, estado nutrimental y eficiencia del uso del nitrógeno en plantas de *P. cooperi* producidas en vivero, con el fin de optimizar el uso de FLC, sin afectar los estándares de calidad. La hipótesis planteada fue que una dosis de hasta 6 g L⁻¹ de FLC es suficiente para que los individuos asimilen los nutrientes requeridos para promover un adecuado desarrollo morfológico y tengan la calidad apropiada.



Figura 1 Árbol de *Pinus cooperi* C.E. Blanco en Otinapa, Durango, México.
Figure 1. *Pinus cooperi* C.E. Blanco tree in Otinapa, Durango, Mexico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Producción de Planta en Vivero

El experimento se realizó en el vivero forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), en la ciudad de Durango, Durango, México (24° 00' 47" N, 104° 40' 57" O y 1809 m de altitud). Se utilizó semilla de *P. cooperi* procedente de rodales naturales del predio rústico Guajolotes, municipio de San Dimas, Durango, México (24° 27' 39.75" N, 105° 32' 53" O y 2540 m de altitud). Las semillas se sumergieron en agua a temperatura ambiente durante 24 h como tratamiento pre-germinativo para favorecer la germinación y después se desinfectaron con una solución de hipoclorito de sodio al 10 por ciento.

Posterior a los tratamientos anteriores se sembraron dos semillas por cavidad, después, donde emergieron dos plantas se dejó sólo la más vigorosa. Las cavidades (3.9 cm de diámetro superior, 15 cm de profundidad y 170 mL de volumen) están contenidas en charolas compactas de 77 cavidades (7×11), de poliestireno expandido, de 35 cm de ancho, 60 cm de largo y 15 cm de profundidad.

Las cavidades fueron llenadas con un sustrato compuesto por una mezcla de turba, perlita y vermiculita (2:1:1 v/v), cuyas características de porosidad, previamente determinadas, fueron: 63.1% de porosidad total, 31% de porosidad de aireación y 32% de capacidad de retención de humedad. Al sustrato se le incorporó el FLC Multicote 8[®] (Haifa Chemicals Ltd.) con 18% de nitrógeno (N), 6% de óxido de fósforo (III) (P₂O₅) y 12% de óxido de potasio (K₂O), más microelementos [(0.4% de hierro (Fe), 0.055% de magnesio (Mg), 0.045% de cobre (Cu), 0.01% de molibdeno (Mo), 0.06% de zinc (Zn) y 0.03% de boro (B)] y ocho meses de liberación a 21 °C de temperatura en el sustrato.

La siembra se realizó el 4 de septiembre de 2020, la germinación inició a los ocho días y continuó hasta los 16 días. Puesto que después de la germinación se presentó la enfermedad conocida como *Damping off*, originada por un conjunto de hongos patógenos, para su control, durante los primeros tres meses después de la siembra se aplicó el fungicida Captán[®] a razón de 2 g L⁻¹ dos veces por semana.

Durante el crecimiento de los individuos los riegos se realizaron a capacidad de sustrato tres veces por semana. Debido al hábito de crecimiento de las plantas del género *Pinus* en vivero, comprendida por tres etapas: establecimiento, crecimiento rápido y preacondicionamiento, durante las primeras 26 semanas posteriores a la siembra, el material vegetativo creció en un invernadero tipo diente de sierra, calibre 720 micras con cubierta de plástico color blanco lechoso, a 16.7 °C de temperatura media y 43.7% de humedad relativa.

Las siguientes 14 semanas se mantuvo bajo malla sombra color negro al 50%, con 20.3 °C en promedio y 38.5% de humedad relativa. En las últimas nueve semanas las condiciones ambientales fueron de intemperie, a 23.7 °C en promedio y 57.8% de humedad. Las mediciones de temperatura y humedad relativa se registraron con un termohigrómetro (Elitech RC-4HC[®]), con intervalo de 30 minutos por medición durante el desarrollo del experimento.

Tratamientos y Diseño Experimental

Se usaron 12 charolas divididas en tres grupos a los que se les asignaron dosis distintas de FLC (Cuadro 1). La unidad experimental se conformó por los 42 individuos centrales de cada charola de 77 cavidades. En total se asignaron cuatro charolas por tratamiento, consideradas como repeticiones, las cuales se distribuyeron bajo un diseño experimental completamente al azar.

Cuadro 1. Dosis de nitrógeno, fósforo y potasio aplicadas por planta, para cada tratamiento de fertilización de liberación controlada en *Pinus cooperi* C.E. Blanco en vivero.

Table 1. Doses of nitrogen, phosphorus and potassium applied per plant, for each controlled release fertilization treatment in *Pinus cooperi* C.E. Blanco in nursery.

Dosis de fertilizante en el sustrato	Cantidad de nutriente aplicado		
	Nitrógeno	Fósforo	Potasio
g L ⁻¹	----- mg planta ⁻¹ -----		
4	122.40	17.81	67.74
6	183.60	26.71	101.60
8	244.80	35.61	135.47

Evaluación Morfológica de la Planta

A las 49 semanas después de la siembra se evaluó el crecimiento morfológico de las plantas, mediante la extracción de 12 individuos al azar, por unidad experimental (48 por tratamiento). Previo a la evaluación se retiraron las raíces del cepellón, mediante el lavado en agua corriente para eliminar las partículas de sustrato adheridas al sistema de raíces. Las variables registradas fueron: diámetro en la base del tallo, medido con un calibrador digital graduado en milímetros (Stereon®); y altura del tallo, determinada con una regla graduada en milímetros (Baco®). Después se separó la parte aérea de la raíz con tijeras de podar y ambas partes se pusieron de forma individual en bolsas de papel previamente etiquetadas para su secado en un horno de ventilación forzada (Felisa® FE-133a) a 65 °C durante 72 h. El peso seco de la raíz (PSR) y de la parte aérea (PSA) se determinó en una balanza analítica (Velab® VE-204) a una precisión de décimas de gramo. Con estos datos se determinó la relación PSA/PSR.

Análisis de Nutrientes Minerales

Se determinó la concentración de nutrientes foliares en una muestra compuesta por 12 individuos por repetición utilizadas en el análisis morfológico, los materiales se trituraron en un molino de corte (Retsch® SM 300) y se tamizaron en malla de 1.0 mm. En el Laboratorio del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID-RASPA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) se determinó la concentración de N por el método Kjeldahl, previa digestión húmeda con ácido nítrico-perclórico (Kjeldahl, 1883). Se estimó la concentración de P por colorimetría con metavanadato de amonio (Murphy y Riley, 1962) y la de K por espectrofotometría de absorción atómica (McKean, 1993).

El contenido de nutrientes minerales fue producto de la concentración (mg g^{-1}) por el peso seco de las acículas (g) (Andivia, Fernández y Vázquez, 2013). Adicional a esto, se elaboraron nomogramas de vectores para conocer el efecto de la fertilización sobre el crecimiento en PSA (Haase y Rose, 1995); dicho análisis consideró los valores medios por tratamiento del contenido de N (eje X), la concentración de N (eje Y) y del PSA (eje Z), expresados en medidas relativas, donde la fertilización más alta se consideró el control y se normalizó a 100. También, se calculó la eficiencia del uso de nitrógeno (EUN) con la siguiente fórmula (Pinto, Chandler y Dumroese, 2008):

$$EUN (\%) = \frac{\text{Cantidad de N extraído en el follaje de la planta (mg)}}{\text{Cantidad de N aplicado a la planta (mg)}} * 100 \quad (1)$$

Análisis Estadístico

El efecto de los tratamientos sobre las variables morfológicas y estado nutrimental se evaluó mediante un análisis de varianza de una vía con el procedimiento PROC GLM de SAS 9.2®. Se utilizó el siguiente modelo lineal:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + e_{ij} \quad (2)$$

Donde:

Y_{ij} = respuesta de la variable dependiente de la fertilización en el i -ésimo tratamiento de la j -ésima repetición

μ = efecto medio general

T_i = efecto atribuido al i -ésimo tratamiento

e_{ij} = error aleatorio

La significación estadística de la prueba de hipótesis se estableció con nivel alfa ($\alpha = 0.05$). Para las variables donde existieron efectos significativos se hicieron pruebas de comparación múltiple de medias por el método de Tukey para definir los mejores tratamientos. En todos los casos se comprobaron el supuesto de normalidad de los datos y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba Shapiro-Wilk y la prueba de Levene respectivamente (SAS Institute, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables Morfológicas

La dosis de FLC tuvo un efecto significativo sobre el crecimiento en diámetro en la base del tallo ($P < 0.0001$), (Figura 2a), pero no en altura ($P = 0.0599$), (Figura 2b). El diámetro en la base del tallo fue superior significativamente en el material vegetativo fertilizado con 6 y 8 g L⁻¹ de FLC (183.6 y 244.8 mg N planta⁻¹, respectivamente). Aun así, en todos los tratamientos se obtuvieron valores de diámetro superiores al indicado por la Norma Mexicana para la Certificación de la Operación de Viveros Forestales NMX-AA-170-SCFI-2016 para plantas de *P. cooperi* (Secretaría de Economía, 2016), por lo que la dosis de 4 g L⁻¹ de FLC podría ser suficiente para cumplir con lo establecido en dicha norma.

Se ha postulado que el diámetro en la base del tallo responde sensiblemente a la fertilización en diferentes especies del género *Pinus*. Por ejemplo, Shi, Grossnickle, Li, Su y Liu (2019) encontraron diferencias significativas en dosis con 100 y 150 mg N planta⁻¹ respecto a 50 mg N planta⁻¹ en *P. tabuliformis* Carr., dosis cercana a la más baja utilizada en este experimento (122.4 mg N planta⁻¹). Por su parte, Oliet *et al.* (2004) observaron un incremento mayor en el diámetro de *P. halepensis* Mill. con 7 g L⁻¹ respecto a 5 y 3 g L⁻¹ de FLC Osmocote (9-13-18 y 17-10-10 de N,P y K).

Los tres nutrientes esenciales suministrados en la fertilización (N, P y K) están directamente involucrados en el crecimiento de las plantas, por lo que se asume que éstas responderán positivamente en crecimiento al incremento de las dosis de FLC. Por ejemplo, el nitrógeno forma parte de componentes celulares, como los aminoácidos, los ácidos nucleicos, y está relacionado con procesos fisiológicos importantes como la fotosíntesis y la división celular. Por su parte, el fósforo está presente en gran cantidad de compuestos de las células vegetales como azúcares, fosfatos, lípidos, ácidos nucleicos y nucleótidos libres (Taiz y Zeiger, 2006).

Las variables peso seco aéreo, de la raíz y total mostraron diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P < 0.0001$). Los individuos con dosis de 6 y 8 g L⁻¹ de FLC fueron superiores en las tres variables con respecto a la dosis de 4 g L⁻¹ (Figura 3). Las plantas con dosis media y alta podrían tener un mejor desempeño y supervivencia en campo por su mejor desarrollo del sistema radicular y aéreo. Sin embargo, es recomendable utilizar una dosis media de FLC durante el cultivo en vivero, dado que se obtiene el mismo resultado con fertilización alta.

En este estudio, el mayor crecimiento de la raíz ocurrió igualmente en las dosis media y alta. Resultados similares encontraron Aguilera-Rodríguez *et al.* (2016) en *P. montezumae* Lamb. donde el peso seco de la raíz fue más alto con dosis de 6 y 8 g L⁻¹ de FLC. Así mismo, en un trabajo con *P. greggii* Engelm. cultivado en vivero, la

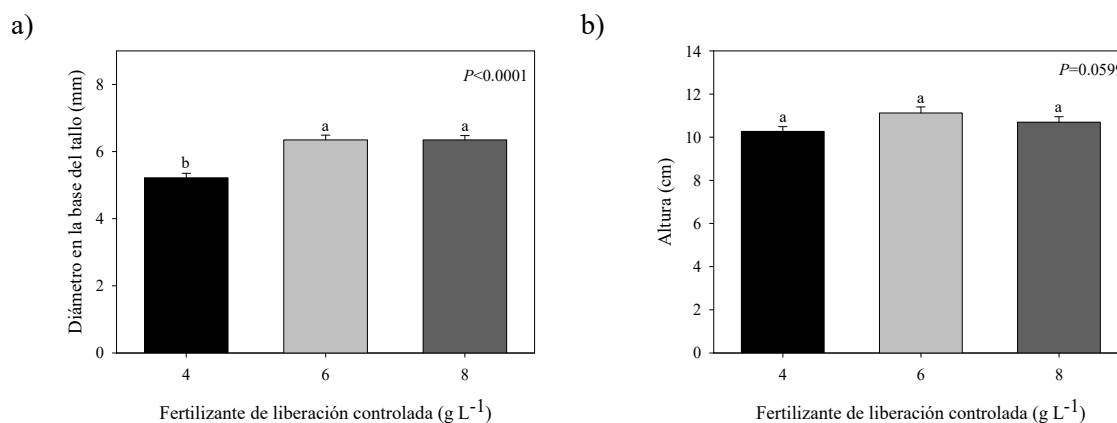


Figura 2. Crecimiento en: a) diámetro en la base del tallo y, b) altura, en plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco, con dosis de 4, 6 y 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada, a 49 semanas en vivero. P = probabilidades límites en el análisis de varianzas. Valores con letras distintas sobre las barras, para la misma variable, indican diferencias significativas ($P < 0.05$) según Tukey, n=48.

Figure 2. Growth in (a) diameter at the base of the stem and (b) height in *Pinus cooperi* C. E. Blanco seedlings with doses of 4, 6, and 8 g L⁻¹ of controlled release fertilizer for 49 weeks at nursery. P = limit probabilities in the analysis of variance (ANOVA). Values with different letters on the bars for the same variable, indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Tukey's test, n = 48.

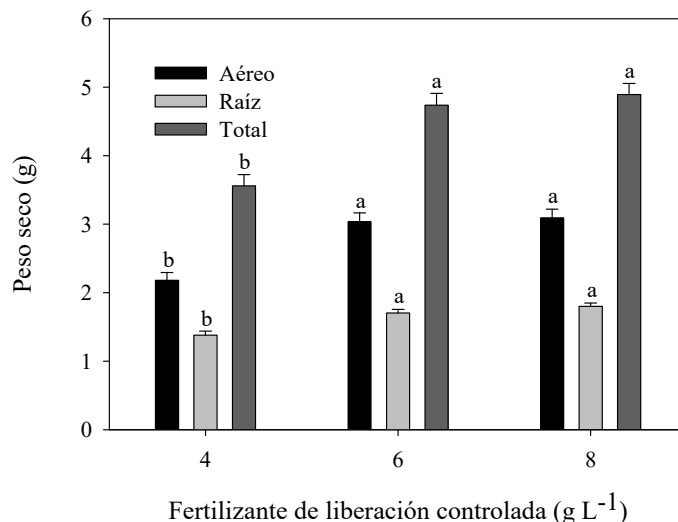


Figura 3. Peso seco de la parte aérea, de la raíz y total, en plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco, con dosis de 4, 6 y 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada, a 49 semanas en vivero. Valores con letras distintas sobre las barras, para la misma variable, indican diferencias significativas ($P < 0.05$) según Tukey; $n = 48$.

Figure 3. Shoot, root, and total dry weights in *Pinus cooperi* C. E. Blanco with doses of 4, 6 and 8 g L⁻¹ of controlled release fertilizer for 49 weeks at nursery. Values with different letters on the bars for the same variable, indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Tukey's test; $n = 48$.

dosis de 6 g L⁻¹ de FLC, evaluada con el complemento de tres alternativas de fertilizantes hidrosolubles, resultó más favorable en el crecimiento de las plantas cuando se aplicó triple 17 de N, P y K en dosis con incremento paulatino de 100 a 300 mg L⁻¹ (Bautista-Ojeda *et al.*, 2018).

Por otra parte, la relación peso seco aéreo/peso seco raíz indica que la planta estuvo en equilibrio, ya que los valores encontrados (1.62, 1.78 y 1.72 para 4, 6 y 8 g L⁻¹, respectivamente) estuvieron dentro del intervalo recomendado por Landis, Dumroese y Haase (2010) (1.5 a 2.5) en las tres dosis. Esto demuestra que las plantas de todos los tratamientos evaluados tendrán más posibilidades de sobrevivir ante un ambiente adverso, ya que la biomasa de la raíz es suficiente para proveer de nutrientes a la parte aérea de la planta (Sáenz-Reyes, Muñoz, Pérez, Rueda y Hernández, 2014).

Los resultados de las variables morfológicas muestran que una dosis media de FLC (6 g L⁻¹) es suficiente para alcanzar los criterios de calidad deseable. Estudios previos coinciden en que dosis medias (6 g L⁻¹), similares a la del presente, generan un adecuado crecimiento de especies forestales producidas en vivero. Bustos *et al.* (2008) determinaron que al usar 5 g L⁻¹ de FLC se favoreció la producción de masa seca de *Nothofagus nervosa* Mirb. Oerst. en vivero. Por su parte, Fu *et al.* (2017) reportaron que el peso seco y el contenido de N en *P. tabulaeformis* Carr. fueron más altos con 80 y 120 mg N planta⁻¹ (3.3 y 4.9 g L⁻¹ de FLC) que con 1.6 g L⁻¹ de FLC. No obstante, la dosis baja fue suficiente para maximizar el peso seco de la planta. Si bien el aumento en la dosis de 6 a 8 g L⁻¹ mejora el desarrollo morfológico de las plantas, este incremento no es significativo, por lo que se estaría propiciando un desperdicio de fertilizante y aumento en los costos.

Estado Nutricional

La fertilización no tuvo efecto significativo ($P > 0.05$) en la concentración de nitrógeno y potasio foliar. Los niveles de fósforo exhibieron un incremento considerable con la dosis alta, seguido por la dosis media (Cuadro 2a). En cambio, el contenido de nitrógeno y de potasio fueron estadísticamente superiores en los tratamientos con fertilización media y alta, y el fósforo con la dosis alta, seguido por la dosis media (Cuadro 2b). De esta manera, se demuestra que los tratamientos con una dosis de 6 g L⁻¹ de FLC se puede promover una adecuada absorción y asimilación de nutrientes, sin la necesidad de aumentar las dosis, lo que podría derivar en toxicidad o desperdicio de producto.

Cuadro 2. Concentración y contenido de nutrientes en el follaje de *Pinus cooperi* C. E. Blanco, a las 49 semanas en vivero con distintas dosis de fertilizante de liberación controlada.**Table 2. Concentration and content of nutrients in the foliage of *Pinus cooperi* C. E. Blanco, after 49 weeks at nursery with different doses of controlled release fertilizer.**

Nutriente	Dosis de fertilizante			Valor P
	4	6	8	
----- g L ⁻¹ -----				
a) Concentración de nutrientes (mg g ⁻¹)				
N	10.30±0.64 a	9.08±0.50 a	9.48±0.19 a	0.8707
P	0.70±0.01 b	0.78±0.01 ab	0.88±0.01 a	0.0103
K	3.98±0.04 a	4.18±0.05 a	3.90±0.07 a	0.5844
b) Contenido de nutrientes (mg planta ⁻¹)				
N	21.98±1.57 b	27.40±1.71 a	29.36±1.36 a	0.0030
P	1.52±0.08 c	2.35±0.10 b	2.70±0.11 a	< 0.0001
K	8.66±0.45 b	12.61±0.53 a	12.02±0.49 a	0.0010

Valores medios de concentración y contenido de nutrientes ± error estándar; n = 48. P = probabilidades límites en análisis de varianzas. Valores con letras distintas, para la misma variable, y macronutriente indican diferencias significativas ($P < 0.05$) según Tukey. N = nitrógeno; P = fósforo; K = potasio.

Mean values of concentration and nutrient content ± standard error; n = 48. P = limit probabilities in analysis of variances. Values with different letters, for the same variable, and macronutrient indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Tukey's test. N = nitrogen; P = phosphorous; K = potassium.

Zamunér-Filho, Venturin, Pereira, Carvalho y Grisi (2012) encontraron una adecuada asimilación de nutrientes minerales con 6 g L⁻¹ de FLC (15-9-12) y exceso de nutrientes con 9 g L⁻¹. En otro estudio con *P. montezumae* se encontró que dosis más altas de FLC Multicote® (8 g L⁻¹) maximizan la concentración de nitrógeno (Aguilera-Rodríguez *et al.*, 2016); aunque, los valores de concentración obtenidos con dosis intermedias (6 g L⁻¹) se encontraron dentro de los niveles nutricionales estándar para coníferas (1.4 a 2.5 % de N). En estos casos, es importante definir la dosis con base en las implicaciones en los costos de producción.

Los resultados obtenidos para la eficiencia del uso de nitrógeno mostraron diferencias significativas entre tratamientos ($P < 0.0001$). La fertilización más baja presentó una EUN mayor que el resto de los tratamientos, seguida por la fertilización media (Figura 4). Por lo tanto, las plantas con menor fertilización nitrogenada tienen mayor eficiencia de uso en cuanto a crecimiento por cantidad de nitrógeno añadido (Franklin *et al.*, 2017).

En el análisis de vectores (Figura 5), se observa que la dosis de 4 g L⁻¹ generó un aumento ligero en la concentración de N y K con respecto a la dosis alta, pero disminuyó en el contenido de nutrientes y el crecimiento de las plantas. Lo anterior sugiere que, al aumentar la fertilización a dosis altas, el nitrógeno y potasio tienen un nivel de suficiencia o probablemente de toxicidad (Haase y Rose, 1995; López-López y Alvarado-López, 2010), lo que inhibe el crecimiento, similar a lo encontrado por Salifu y Timmer (2003).

Por otra parte, las plantas con dosis de 6 g L⁻¹ tuvieron una ligera disminución en la concentración y contenido de N y P, pero el crecimiento fue constante respecto a la dosis alta; así, se puede establecer que el nivel de nutrientes obtenido con 6 g L⁻¹ es suficiente para mantener el crecimiento y, si se eleva la dosis de fertilización no habrá efecto en el crecimiento o podría presentarse el exceso de nutrientes (Haase y Rose, 1995).

Sólo en el tratamiento de dosis media se obtuvo un consumo de lujo de potasio; es decir, que aumentó el contenido y concentración de potasio y el peso seco se mantuvo (Timmer y Stone, 1978; Haase y Rose, 1995; Salifu y Timmer, 2003). Con estas interpretaciones se demuestra que la dosis media es apta para mantener la nutrición adecuada y crecimiento de plantas en vivero y así evitar problemas por fertilización excesiva o toxicidad.

Las plantas metabolizan gran cantidad de N en proteínas cosechadoras de la luz (Zhu, Long y Ort, 2008), entre otras cosas, esto facilita la producción de carbohidratos, ácidos orgánicos y aminoácidos, componentes básicos para la acumulación de biomasa (Nunes-Nesi, Fernie y Stitt, 2010). La cantidad y la fuente de nitrógeno influyen en el crecimiento y desarrollo de las plantas; por ejemplo, en la arquitectura de la raíz y la relación tallo/raíz (Scheible *et al.*, 2004; Vidal y Gutiérrez, 2008). Por su parte, el fósforo cumple funciones esenciales en el metabolismo energético celular y en el proceso de la fotosíntesis, los cuales están directamente relacionados con el crecimiento. Una fertilización adecuada permite mantener el equilibrio en los procesos fisiológicos básicos e impulsar el crecimiento y a la vez mejorar el desempeño de las plantas en campo (Grossnickle y MacDonald, 2018); sin embargo, la fertilización excesiva puede afectar el óptimo desarrollo de los individuos por efectos de toxicidad (Salifu y Timmer, 2003).

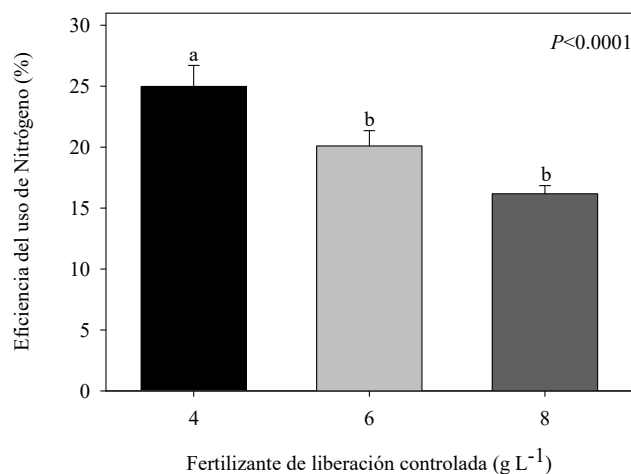


Figura 4. Eficiencia del uso de nitrógeno (definido como la relación entre la cantidad de N extraído en el follaje y la cantidad de N aplicado) en plantas de *Pinus cooperi* C. E. Blanco, con dosis de 4, 6 y 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada a 49 semanas en vivero. Valores con letras distintas sobre las barras indican diferencias significativas ($P < 0.05$) según Tukey, $n = 48$.

Figure 4. Nitrogen use efficiency (defined as the ratio between the amount of N extracted in foliage and the amount of N applied) in *Pinus cooperi* C. E. Blanco plants with doses of 4, 6 and 8 g L⁻¹ of controlled release fertilizer for 49 weeks growing at nursery. Values with different letters on the bars indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Tukey's test, $n = 48$.

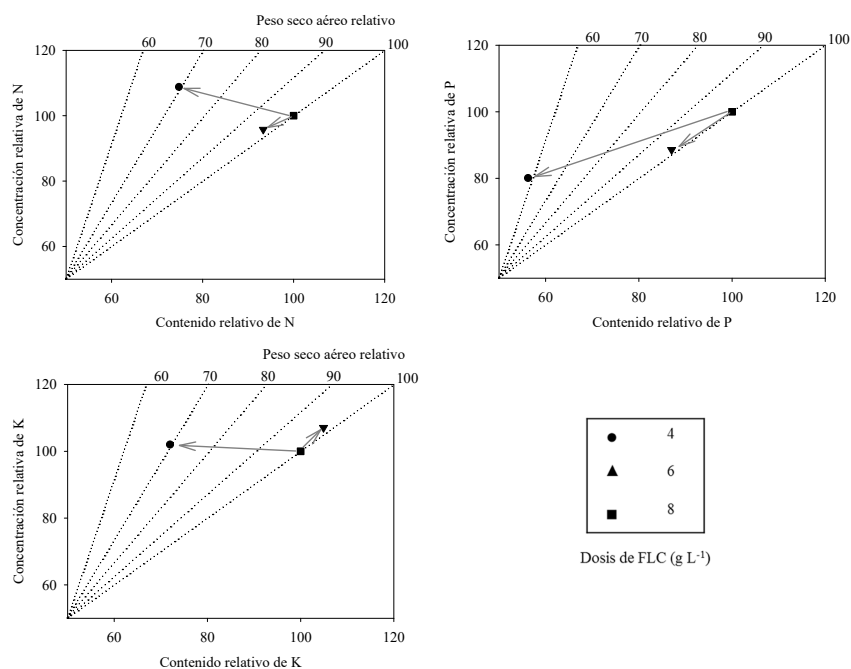


Figura 5. Nomogramas de análisis de vectores del estado nutricional de *P. cooperi* C.E. Blanco, con dosis de 4, 6 y 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada (FLC), a 49 semanas en vivero.

Figure 5. Vector analysis nomograms of the nutritional status of *P. cooperi* C.E. Blanco with doses of 4, 6 and 8 g L⁻¹ of controlled release fertilizer for 49 weeks at nursery.

Además, el uso excesivo de nutrientes, puede causar daños en el medio ambiente y el costo en la fertilización es un factor que sobresale en la toma de decisiones durante la producción de plantas forestales en vivero. El costo en Durango, México de un bulto de 25 kg del FLC Multicote 8° es de \$2500 MXN (Dato: 11 de septiembre de 2023); es decir, producir 100 000 individuos, utilizando 200 mL de sustrato por envase, con dosis de 6 g L⁻¹ representa un costo de \$12 000 MXN. En este sentido, el aumento de dos gramos de FLC implica un aumento de \$ 4000 MXN por esa cantidad de plantas. Con base en los resultados obtenidos, se recomienda utilizar la dosis de fertilización de 6 g L⁻¹, ya que permitió que existiera un adecuado crecimiento y nutrición de las plantas; además, favoreció la eficiencia del uso de los fertilizantes de liberación controlada y su costo es menor, en comparación con la dosis de 8 g L⁻¹.

CONCLUSIONES

Según los tratamientos evaluados, existieron diferencias significativas en el crecimiento morfológico de las plantas; con la aplicación de 6 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada (18-6-12 de N, P y K) se obtienen resultados favorables; además, esa dosis tiene una adecuada concentración y contenido de N y P. La eficiencia del uso de nitrógeno es mejor en la dosis de 4 g L⁻¹. La dosis de 8 g L⁻¹ no propicia un efecto superior en el crecimiento morfológico de las plantas; en cambio, provoca exceso de nutrientes en las plantas. La dosis de 6 g L⁻¹ es la más equilibrada respecto a la morfología y estado nutricional de las plantas de *P. cooperi*.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

El conjunto de datos utilizados o analizados en la presente investigación, están disponibles a solicitud expresa al autor de correspondencia.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Diseño y establecimiento del experimento: L.E.M.N., J.A.P.R. y J.L.G.R. Seguimiento al ensayo: L.E.M.N., J.A.P.R. y J.L.G.R. Toma, captura y análisis: L.E.M.N. y J.A.S.R. Interpretación de resultados: L.E.M.N., J.A.S.R. y J.A.P.R. Redacción del manuscrito: L.E.M.N. Documentación y revisión de bibliografía: L.E.M.N., J.A.P.R., J.A.S.R. y J.L.G.R. Revisión y edición del manuscrito: J.A.P.R., J.L.G.R., J.A.S.R., M.M.R., A.C.P. y P.A.D.C.

AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED), por las facilidades otorgadas para el desarrollo del ensayo en vivero, y el autor de correspondencia agradece las facilidades otorgadas durante el ejercicio del año sabático por la UJED. A Ricardo Martínez Casas por su apoyo en el establecimiento del experimento en vivero y a Rosa Elvira Madrid Aispuro por su contribución en la evaluación morfológica de la planta.

LITERATURA CITADA

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T., & Ordaz-Chaparro, V. M. (2016). Production of *Pinus montezumae* Lamb. with different substrates and controlled release fertilizers. *Agrociencia*, 50(1), 107-118.
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Trejo-Téllez, L. I., & 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, 719-732. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i8.2664>
- Alzugaray, P., Haase, D., & Rose, R. (2004). Efecto del volumen radicular y la tasa de fertilización sobre el comportamiento en terreno de plantas de pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) producidas con el método 1+1. *Bosque*, 25(2), 17-33. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002004000200003>
- Andivia, E., Fernández, M., & Vázquez-Piqué, J. (2013). Assessing the effect of late-season fertilization on Holm oak plant quality: Insights from morpho-nutritional characterizations and water relations parameters. *New Forests*, 45(2), 149-163. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9397-1>
- Andivia, E., Villar-Salvador, P., Oliet, J. A., Puértolas, J., Dumroese, R. K., Ivetić, V., ... Ovalle, J. F. (2021). Climate and species stress resistance modulate the higher survival of large seedlings in forest restorations worldwide. *Ecological Applications*, 31(6), 1-11. <https://doi.org/10.1002/eap.2394>
- Bautista-Ojeda, G. I., Prieto-Ruiz, J. A., Hernández-Díaz, J. C., Basave-Villalobos, E., Goche-Téllez, J. R., & Montiel-Antuna, E. (2018). Crecimiento de *Pinus greggii* Engelm. bajo diferentes rutinas de fertilización en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(49), 213-233. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i49.171>
- Béjar-Pulido, S. J., Cantú-Silva, I., Domínguez-Gómez, T. G., González-Rodríguez, H., Marmolejo-Monciváis, J. G., Yáñez-Díaz, M. I., & Luna-Robles, E. O. (2018). Redistribución de la precipitación y aporte de nutrimentos en *Pinus cooperi* C.E. Blanco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 94-120. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.237>
- Bustos, F., González, M. E., Donoso, P., Gerding, V., Donoso, C., & Escobar, B. (2008). Efectos de distintas dosis de fertilizante de liberación controlada (Osmocote®) en el desarrollo de plantas de coigüe, raulí y ulmo. *Bosque*, 29(2), 155-161. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002008000200008>
- Castro-Garibay, S. L., Aldrete, A., López-Upton, J., & Ordaz Chaparro, V. M. (2019). Caracterización física y química de sustratos con base en corteza y aserrín de pino. *Madera y Bosques*, 25(2), 1-10. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521520>
- Cruz-Cobos, F., De los Santos-Posadas, H. M., & Valdez-Lazalde, J. R. (2008). Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia*, 42, 473-485.
- Davis, A. S., & Jacobs, D. F. (2005). Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests*, 30, 295-311. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-7480-y>
- Fu, Y., Oliet, J. A., Li, G., & Wang, J. (2017). Effect of controlled release fertilizer type and rate on mineral nutrients, non-structural carbohydrates, and field performance of Chinese pine container-grown seedlings. *Silva Fennica*, 51(2), 1-13. <https://doi.org/10.14214/sf.1607>
- Franklin, O., Aguetoni, C. C., Gruffman, L., Palmroth, S., Oren, R., & Näsholm, T. (2017). The carbon bonus of organic nitrogen enhances nitrogen use efficiency of plants. *Plant, Cell & Environment*, 40(1), 1-19. <https://doi.org/10.1111/pce.12772>
- García-Arévalo, A., & González-Elizondo, M. S. (2003). *Pináceas de Durango*. (2ª ed.). Durango, México: CONAFOR.
- González-Elizondo, M. S., González-Elizondo, M., Tena-Flores, J. A., Ruacho-González, L., & López-Enríquez, I. L. (2012). Vegetación de la Sierra Madre Occidental, México: Una síntesis. *Acta Botánica Mexicana*, 100(1), 351-404. <https://doi.org/10.21829/abm100.2012.40>
- González-Orozco, M. M., Prieto-Ruiz, J. A., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Chávez-Simental, J. A., & Rodríguez-Laguna, R. (2018). Sustratos a base de aserrín crudo con fertilización y la calidad de planta de *Pinus cooperi* Blanco en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 203-225. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.125>
- Grossnickle, S. C., & MacDonald, J. E. (2018). Why seedlings grow: influence of plant attributes. *New Forests*, 49(1), 1-34. <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9606-4>
- Haase, D. L., & Rose, R. (1995). Vector analysis and its use for interpreting plant nutrient shifts in response to silvicultural treatments. *Forest Science*, 41(1), 54-66. <https://doi.org/10.1093/forestscience/41.1.54>
- Jacobs, D. F., & Timmer, V. R. (2005). Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests*, 30, 147-166. <https://doi.org/10.1007/s11056-005-6572-z>
- Juárez-Mirón, F., López-López, M. A., & Estañol-Botello, E. (2021). Curvas de abastecimiento nutrimental y concentraciones críticas nutrimentales para *Pinus patula* Schl. et Cham. en etapa de vivero. *Terra Latinoamericana*, 39, 1-14. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.894>
- Kjeldahl, J. (1883). Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen Körpern [New method for the determination of nitrogen in organic substances]. *Fresenius Journal Analytical Chemistry*, 22, 366-382. <https://doi.org/10.1007/BF01338151>
- Landis, T. D., Dumroese, R. K., & Haase, D. L. (2010). *The container tree nursery manual. Seedling processing, storage, and outplanting*. Volume Seven. Washington, DC, USA: USDA.
- López-López, M. Á., & 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-Ruiz, J. Á., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., Chávez-Simental, J. A., & Mexal, J. G. (2020a). Alternative substrates and fertilization doses in the production of *Pinus cembroides* Zucc. in nursery. *Forests*, 11(1), 1-13. <https://doi.org/10.3390/F11010071>
- Madrid-Aispuro, R. E., Prieto-Ruiz, J. Á., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., & Chávez-Simenta, J. A. (2020b) Crecimiento de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero en diversos sustratos y fertilizantes. *Agrociencia*, 54, 539-554. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v54i4.2051>
- McKean, S. J. (1993). *Manual de análisis de suelos y tejido vegetal*. Documento de trabajo No. 129. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Murphy, J., & Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27, 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)88444-5)
- Nunes-Nesi, A., Fernie, A. R., & Stitt, M. (2010). Metabolic and signaling aspects underpinning the regulation of plant carbon nitrogen interactions. *Molecular Plant*, 3(6), 973-996. <https://doi.org/10.1093/mp/ssq049>
- Oliet, J. A., Planelles, R., Segura, M. L., Artero, F., & Jacobs, D. F. (2004). Mineral nutrition and growth of containerized *Pinus halepensis* seedlings under controlled-release fertilizer. *Scientia Horticulturae*, 103(1), 113-129. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.019>

- Oliet, J. A., Planelles, R., Artero, F., Valverde, R., Jacobs, D. F., & Segura, M. L. (2009). Field performance of *Pinus halepensis* planted in Mediterranean arid conditions: relative influence of seedling morphology and mineral nutrition. *New Forests*, 37(3), 313-331. <https://doi.org/10.1007/s11056-008-9126-3>
- Pinto, J. R., Chandler, R. A., & Dumroese, R. K. (2008). Growth, nitrogen use efficiency, and leachate comparison of subirrigated and overhead irrigated pale purple coneflower seedlings. *Hort Science*, 43(3), 897-901.
- Robles-Villanueva, F. A., Rodríguez-Trejo, D. A., & Villanueva Morales, A. (2017). Calidad de planta y supervivencia en reforestación de *Pinus montezumae* Lamb. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 8(42), 55-76. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i42.19>
- Rose, R., Haase, D. L., & Arellano, E. (2004). Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. *Bosque*, 25(2), 89-100. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002004000200009>
- Sáenz-Reyes, J. T., Muñoz-Flores, H. J., Pérez-D, C. M. A., Rueda-Sánchez, A., & Hernández-Ramos, 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>
- Salcido-Ruiz, S., Prieto-Ruiz, 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>
- Salcido-Ruiz, S., Prieto-Ruiz, J. Á., García-Rodríguez, J. L., Santana-Aispuro, E., & Chávez-Simental, J. A. (2021). *Pinus greggii* Engelm.: Respuesta a la inoculación micorrízica controlada y a la fertilización en vivero. *Agrociencia*, 55, 273-290. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i3.2419>
- Salifu, K. F., & Timmer, V. R. (2003). Optimizing nitrogen loading of *Picea mariana* seedlings during nursery culture. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 1287-1294. <https://doi.org/10.1139/X03-057>
- SAS Institute (2008). *SAS/STAT User guide. Release 9.2*. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.
- Scheible, W. R., Morcuende, R., Czechowski, T., Fritz, C., Osuna, D., Palacios-Rojas, N., ... Stitt, M. (2004). Genome-wide reprogramming of primary and secondary metabolism, protein synthesis, cellular growth processes, and the regulatory infrastructure of Arabidopsis in response to nitrogen. *Plant Physiology*, 136(1), 2483-2499. <https://doi.org/10.1104/pp.104.047019>
- Secretaría de Economía. (2016). Norma Oficial Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2016 antes NMX-AA-170-SCFI-2014. *Certificación de la operación de viveros forestales. Diario Oficial de la Federación*. D.F., México: SEGOB.
- Shi, W., Grossnickle, S. C., Li, G., Su, S., & Liu, Y. (2019). Fertilization and irrigation regimes influence on seedling attributes and field performance of *Pinus tabulaeformis* Carr. *Forestry*, 92(1), 97-107. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal*. (3ª ed.). Sunderland, MA, USA: Universidad Jaume. ISBN: 978-84-8021-601-2
- 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.
- Uscola, M., Villar-Salvador, P., Gross, P., & Maillard, P. (2015). Fast growth involves high dependence on stored resources in seedlings of Mediterranean evergreen trees. *Annals of Botany*, 115(6), 1001-1013. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv019>
- Vicente-Arbona, J. C., Carrasco-Hernández, V., Rodríguez-Trejo, D. A., & Villanueva-Morales, A. (2019). Calidad de planta de *Pinus greggii* producida en sustratos a base de aserrín. *Madera y Bosques*, 25(2), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521784>
- Vidal, E. A., & Gutiérrez, R. A. (2008). A systems view of nitrogen nutrient and metabolite responses in Arabidopsis. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(5), 521-529. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2008.07.003>
- Villar-Salvador, P., Uscola, M., & Jacobs, D. F. (2015). The role of stored carbohydrates and nitrogen in the growth and stress tolerance of planted forest trees. *New Forests*, 46, 813-839. <https://doi.org/10.1007/s11056-015-9499-z>
- Zamunér-Filho, A. N., Venturin, N., Pereira, A. V., Carvalho-Pereira, E. B., & Grisi-Macedo, R. L. (2012). Doses of controlled-release fertilizer for production of rubber tree rootstocks. *Cerne, Lavras*, 18(2), 239-245. <https://doi.org/10.1590/s0104-77602012000200008>
- Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2008). What is the maximum efficiency with photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology*, 19(2), 153-159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>