



Growth of *Pinus durangensis* Mart. in response to substrate types and controlled-release fertilizer rates in a nursery

Crecimiento de *Pinus durangensis* Mart. en respuesta al uso de sustratos y dosis de fertilizante de liberación controlada en vivero

Manuel A. González-Alemán¹; Manuel Aguilera-Rodríguez²; José C. Hernández-Díaz³; Christian Wehenkel³; Rosa E. Madrid-Aispuro⁴; José Á. Prieto-Ruiz^{1*}

¹Universidad Juárez del Estado de Durango, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales. Av. Papaloapan y bulevar Durango s/n., col. Valle del Sur. C. P. 34120. Durango, Durango, México.

²Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales. km 38.5 carretera federal México-Texcoco. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

³Universidad Juárez del Estado de Durango, Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. Bulevar Guadiana 501, fracc. Ciudad Universitaria. C. P. 34120. Durango, Durango, México.

⁴Colegio de Posgraduados. Campus Montecillo. km 36.5 carretera federal México- Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: jprieto@ujed.mx; tel.: +52 618 136 1952.

Abstract

Introduction. Substrate and fertilization are essential to produce forest species with favorable morphological characteristics.

Objectives. To evaluate the morphological growth and nutrient assimilation in *Pinus durangensis* Mart. seedlings, and to estimate costs in response to the use of three substrate mixtures combined with three rates of a controlled-release fertilizer in a nursery.

Materials and methods. The plants were grown under the effect of nine treatments consisting of three substrates with varying proportions of fresh pine sawdust, composted pine bark, and peat moss, combined with three application rates of the controlled-release fertilizer (CRF) Multicote[®] 8-month (18-6-12 N-P-K), arranged in a randomized block experimental design. Plant height, stem diameter, dry biomass, nutrient uptake, and production costs were evaluated after 11 months.

Results. Growth variables and nutrient uptake showed statistically significant differences ($p \leq 0.05$) among treatments. The combination of 50 % fresh sawdust + 25 % composted bark + 25 % peat moss, with CRF applied at rates of 9 and 12 g·L⁻¹, produced high-quality plants in accordance with the Mexican Standard NMX-AA-170-SCFI-2014. However, the 9 g·L⁻¹ rate resulted in lower production costs.

Conclusion. A specific combination of substrate and CRF application rate was identified that most effectively promotes the growth and nutrient uptake of *P. durangensis* seedlings in the nursery; furthermore, it reduces production costs.

Keywords: fresh sawdust, composted bark, plant quality, Multicote, peat moss.

Resumen

Introducción. El sustrato y la fertilización son fundamentales para la producción de planta de especies forestales con características morfológicas propicias.

Objetivos. Evaluar el crecimiento morfológico y la asimilación de nutrientes en plantas de *Pinus durangensis* Mart. y estimar los costos en respuesta al uso de tres mezclas de sustratos en combinación con tres dosis de un fertilizante de liberación controlada en vivero.

Materiales y métodos. Las plantas se produjeron bajo el efecto de nueve tratamientos compuestos por tres sustratos con diferentes proporciones de aserrín fresco de pino, corteza compostada de pino y turba de musgo, combinados con tres dosis del fertilizante de liberación controlada (FLC) Multicote[®] 8 meses (18-6-12 de N-P-K) en un diseño experimental de bloques al azar. A los 11 meses se evaluó altura, diámetro, biomasa seca, asimilación de nutrientes y costos de las plantas.

Resultados. Las variables de crecimiento y la asimilación de nutrientes tuvieron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos. La combinación de 50 % aserrín fresco + 25 % corteza compostada + 25 % turba de musgo, con FLC en dosis de 9 y 12 g·L⁻¹ produjo planta de calidad de conformidad con la Norma NMX-AA-170-SCFI-2014; sin embargo, la dosis de 9 g·L⁻¹ implicó un costo menor.

Conclusión. Se identificó una combinación de sustrato y dosis de FLC que favorece más el crecimiento y asimilación de nutrimentos de plantas de *P. durangensis* en vivero; además, reduce los costos de producción.

Palabras clave: aserrín fresco, corteza compostada, calidad de planta, Multicote, turba de musgo.

Please cite this article as follows (APA 7): González-Alemán, M. A., Aguilera-Rodríguez, M., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, C., Madrid-Aispuro, R. E., & Prieto-Ruiz, J. A. (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, e24039. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.09.039>



Introduction

Between 2001 and 2022, an average of 208 746 ha were deforested annually in Mexico (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). During the last three decades, reforestation efforts and the construction of soil and water conservation works have been carried out to counteract the deterioration of forest resources and to implement soil and water conservation projects. Specifically, during the 2013–2018 period, an average of 167 554 ha were reforested each year, equivalent to 167.5 million seedlings (CONAFOR, 2021). However, the deforestation deficit persists, and first-year survival rates remain below 65 % (Burney et al., 2015; Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL], 2018; Prieto et al., 2016). In the case of *Pinus durangensis* Mart., the average survival rate was just 34 % after 2.5 years of planting in the northwest region of the state of Durango (Sánchez-Hernández et al., 2022). Based on results from different planting sites, it has been demonstrated that seedling quality is critical to survival and growth, and it is directly influenced by nursery inputs and management practices (Haase & Davis, 2017; Villar Salvador et al., 2021). To ensure that nursery-grown seedlings develop the required morphological and physiological characteristics, it is essential to apply management practices that match the production process with the climatic and soil conditions of the planting site (Grossnickle & MacDonald, 2018).

Among the cultural practices considered for nursery plant production, the following stand out: sowing date, irrigation technique, nutrition methods, management of environmental conditions, as well as pest and disease prevention and control. Another important aspect to consider is the characteristics of inputs, such as germplasm, containers, substrate, fertilizer, water, and infrastructure (Grossnickle, 2018; Madrid-Aispuro et al., 2021).

Experiences in the production of forest species seedlings in Mexico suggest a continuous need to explore alternatives for substrates made from locally or regionally sourced materials that are low-cost and readily available. It is important that these substrates are environmentally friendly while enabling the development of plants with quality equal to or better than those produced with traditional inputs, such as peat moss, vermiculite, and perlite, which are imported from Canada and Europe (Aguilera-Rodríguez et al., 2023; Gayosso-Rodríguez et al., 2016).

In Mexico, in most states where timber harvesting occurs, the use of residues derived from the processing of forest products, such as composted pine bark and uncomposted (fresh) sawdust from conifers and hardwoods, are already options considered in several forest nurseries (Aguilera-Rodríguez et al., 2021;

Introducción

En México, durante el periodo de 2001 a 2022 se deforestaron anualmente 208 746 ha en promedio (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2023). Durante las últimas tres décadas se han realizado reforestaciones y se han construido obras de conservación de suelo y agua, con el fin de contrarrestar el deterioro de los recursos forestales y construir obras de conservación de suelo y agua. Al respecto, en el periodo 2013–2018 se reforestaron en promedio 167 554 ha anuales, equivalentes a 167.5 millones de plantas (CONAFOR, 2021); sin embargo, el déficit de superficie deforestada continúa y las tasas de supervivencia al año de plantación son menores de 65 % (Burney et al., 2015; Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social [CONEVAL], 2018; Prieto et al., 2016). Específicamente, en *Pinus durangensis* Mart., el promedio de supervivencia fue 34 % después de 2.5 años de plantado en el noroeste del estado de Durango (Sánchez-Hernández et al., 2022). Con base en los resultados de diversos sitios de plantación, se ha constatado que la calidad de las plantas es fundamental en la supervivencia y crecimiento, y que depende directamente de los insumos y las prácticas de manejo utilizadas en vivero (Haase & Davis, 2017; Villar Salvador et al., 2021). Para garantizar que las plantas producidas en vivero adquieran las características morfológicas y fisiológicas requeridas, es necesario el uso de prácticas de manejo que consideren la relación entre el proceso de producción y las condiciones climáticas y edáficas del sitio de plantación (Grossnickle & MacDonald, 2018).

Entre las prácticas culturales que se consideran para la producción de plantas en vivero, destacan las siguientes: fecha de siembra, técnica de riego, formas de nutrición, manejo de las condiciones medioambientales, así como prevención y control de plagas y enfermedades. Otro aspecto por considerar son las características de los insumos, tales como: germoplasma, envase, sustrato, fertilizante, agua e infraestructura (Grossnickle, 2018; Madrid-Aispuro et al., 2021).

Las experiencias en producción de planta de especies forestales en México sugieren la necesidad de la búsqueda continua de alternativas de sustratos elaborados con insumos locales o regionales de costo bajo y con disponibilidad alta. Es importante que estos no sean dañinos al ambiente, pero que permitan el desarrollo de las plantas con calidad igual o mejor que las producidas con insumos tradicionales, como turba de musgo, vermiculita y perlita que son importados de Canadá y Europa (Aguilera-Rodríguez et al., 2023; Gayosso-Rodríguez et al., 2016).

En México, en la mayoría de las entidades donde existe aprovechamiento maderable, el uso de residuos derivados de la transformación de productos forestales, como la corteza compostada de pino y el aserrín de coníferas

Cervantes-Rodríguez et al., 2018; González et al., 2018). This is because these by-products are abundantly available, and cost less compared to the materials currently in use (peat moss, vermiculite, and perlite). From 2009 to 2018, roundwood forest production ranged annually from 5.8 to 8.3 million cubic meters (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente [SEMARNAT], 2021). Due to the sawing process, approximately 12 to 14 % of that volume is converted into sawdust (Mateo Sánchez et al., 2023), representing an availability exceeding 690 000 m³ annually. Therefore, its use as a component of nursery substrates is a viable option.

Concurrent with the use of fresh sawdust and composted bark as substrate components, the use of controlled-release fertilizers (CRFs), either as an adjunct or replacement for soluble fertilizers, is increasingly adopted in nursery production. CRFs have demonstrated efficacy in enhancing plant growth by providing a sustained nutrient release aligned with plant uptake patterns, thereby minimizing nutrient losses through leaching and volatilization and conferring environmental advantages. Furthermore, CRFs simplify application and reduce operational costs since they are incorporated into the substrate only once, eliminating the need for repetitive labor typically required for the periodic preparation and application of water-soluble fertilizers through irrigation (Aguilera-Rodríguez et al., 2021; Landis & Dumroese, 2009; Rose et al., 2004).

Continuous research is essential to establish the optimal input ratios for substrates and to determine the appropriate fertilizer doses for each species, based on their growth traits and production management practices. This study aimed to assess the morphological growth response of *P. durangensis* seedlings to three substrate mixtures combined with three doses of a controlled-release fertilizer (CRF); additionally, to estimate nutrient uptake in the seedlings due to the fertilizer and to determine production costs based on the substrates and fertilization rates studied. The hypothesis was that at least one combination of substrate and fertilizer rate would enhance growth and nutrient uptake while reducing production costs of *P. durangensis* seedlings in the nursery.

Materials and Methods

Study site

The study was conducted at the forest nursery of the Faculty of Forestry and Environmental Sciences, Universidad Juárez del Estado de Durango, located in Victoria de Durango, Durango, Mexico (24° 01' 13" N, 104° 68' 25" W), at an elevation of 1890 m. The site has an average annual temperature of 17 °C (with the

de latifoliadas sin compostar (fresco), son opciones ya consideradas en varios viveros forestales (Aguilera-Rodríguez et al., 2021; Cervantes-Rodríguez et al., 2018; González et al., 2018). Esto debido a que dichos derivados se encuentran disponibles en forma abundante y a bajo costo con respecto a los materiales que se usan a la fecha (turba de musgo, vermiculita y perlita). De 2009 a 2018, la producción forestal maderable fluctuó de 5.8 a 8.3 millones de metros cúbicos rollo (Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente [SEMARNAT], 2021); debido al proceso de aserrío, entre 12 y 14 % de ese volumen se transforma en aserrín (Mateo Sánchez et al., 2023), lo que implica una disponibilidad superior a 690 000 m³ anuales, por lo que su empleo como componente de los sustratos en viveros es una posibilidad.

A la par del uso de aserrín fresco y de la corteza compostada como componentes de las mezclas de sustratos, el empleo de fertilizantes de liberación controlada (FLC), en complemento o sustitución de fertilizantes hidrosolubles, es una práctica cada vez más común. Esto debido a que los FLC han mostrado resultados favorables en el crecimiento, ya que facilitan la disponibilidad de nutrientes por un tiempo prolongado conforme a las necesidades de la planta y reducen pérdidas por lixiviación y volatilización de los fertilizantes, con el consecuente beneficio ambiental. Además, el FLC simplifica su aplicación y reduce costos de operación al incorporarse por única vez al sustrato, lo cual evita el uso de mano de obra en forma repetitiva tal como es requerida en las fertilizaciones hidrosolubles que se preparan y aplican periódicamente en el riego (Aguilera-Rodríguez et al., 2021; Landis & Dumroese, 2009; Rose et al., 2004).

Por lo anterior, es necesaria la investigación continua sobre las proporciones de insumos que deben tener los sustratos y la definición de las dosis apropiadas de fertilizantes para cada especie a propagar, en función de sus características de crecimiento y del manejo de proceso de producción. El objetivo del presente estudio fue evaluar el crecimiento morfológico de plantas de *P. durangensis* como respuesta al uso de tres sustratos combinados con tres dosis de un FLC; además, de estimar la asimilación de nutrientes en las plantas debido al fertilizante y determinar los costos de producción con base en los sustratos y las dosis de fertilización estudiadas. Se planteó la hipótesis de que al menos una combinación de sustrato y dosis de fertilizante favorece más el crecimiento y asimilación de nutrimentos, y reduce los costos de producción de plantas de *P. durangensis* en vivero.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en el vivero forestal de la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad Juárez del Estado de Durango, ubicado en Victoria de

coldest month averaging 1.7 °C and the warmest month 31 °C) and an average annual precipitation of 500 mm (Reyes Rodríguez et al., 2024).

Growth conditions

The plants grew for 11 months under three environmental conditions: a) a forest greenhouse covered with 720 µm milky white plastic and 50 % black shade cloth beneath the plastic film (September 2020–February 2021); b) 50 % black shade cloth (March–May 2021); and c) open field (June–July 2021). Air temperature and humidity were monitored using an Elitech® hygrothermometer (Table 1).

Substrate porosity

Total porosity, air-filled porosity, and water-holding capacity of the substrates were determined using the methodology proposed by Landis et al. (1990) (Table 2).

Treatments and experimental design

A total of nine treatments were evaluated, corresponding to combinations of three substrates prepared with different ratios of fresh sawdust (FS), composted pine bark (CB), and peat moss (PM), along with three application rates of Multicote® controlled-release fertilizer, with an approximate release period of eight months. The CRF formulation is Nitrogen (18 %) + Phosphorus (6 %) + Potassium (12 %) + Boron (0.03 %) + Copper (0.045 %) + Iron (0.4 %) + Manganese (0.055 %) + Molybdenum (0.01 %) + Zinc (0.06 %).

Durango, Durango, México (24° 01' 13" N y 104° 68' 25" O), a una altitud de 1890 m con temperatura media anual de 17 °C (en promedio, mes más frío 1.7 °C y mes más caliente 31 °C) y precipitación media anual de 500 mm (Reyes Rodríguez et al., 2024).

Condiciones de crecimiento

Las plantas crecieron durante 11 meses en tres condiciones ambientales: a) invernadero forestal cubierto con plástico blanco lechoso de 720 µm y malla sombra al 50 % color negro abajo de la película plástica (septiembre 2020-febrero 2021); b) malla sombra al 50 % color negro (marzo-mayo 2021); c) intemperie (junio-julio 2021). La temperatura y humedad del ambiente se monitorearon con un higrotermómetro Elitech® (Cuadro 1).

Porosidad de los sustratos

La porosidad total, porosidad de aireación y capacidad de retención de agua de los sustratos se determinaron con la metodología propuesta por Landis et al. (1990) (Cuadro 2).

Tratamientos y diseño experimental

Se evaluaron nueve tratamientos que corresponden a la combinación de tres sustratos preparados en diferentes proporciones de aserrín fresco (AF), corteza molida de pino compostada (CC) y turba de musgo (TM), y tres dosis de FLC Multicote® de liberación aproximada de ocho meses. La formulación del FLC es Nitrógeno (18 %) + Fósforo (6 %) + Potasio (12 %) + Boro (0.03 %) +

Table 1. Predominant temperature and humidity conditions during the development of the *Pinus durangensis* seedling production trial in the nursery.

Cuadro 1. Temperatura y humedad prevalecientes durante el desarrollo del ensayo de producción de plantas de *Pinus durangensis* en vivero.

Period / Período	Greenhouse (September 2020-February 2021)/ Invernadero (septiembre 2020-febrero 2021)	Shade net 50 % (March-May 2021)/ Malla sombra 50 % (marzo-mayo 2021)	Open field (June-July 2021)/ Intemperie (junio-julio 2021)
Maximum temperature (°C) / Temperatura máxima (°C)	32.8	39.2	44.2
Minimum temperature (°C) / Temperatura mínima (°C)	-1.1	-0.2	9.2
Average temperature (°C) / Temperatura promedio (°C)	15.9	20.3	23.4
Maximum humidity (%) / Humedad máxima (%)	77.1	87.5	89.3
Minimum humidity (%) / Humedad mínima (%)	15.7	9.1	15.0
Average humidity (%) / Humedad promedio (%)	47.0	36.7	57.5

Table 2. Porosity of the three substrate mixtures used in the *Pinus durangensis* seedling production trial in the nursery.**Cuadro 2. Porosidad de las tres mezclas de sustratos utilizados en el ensayo de producción de plantas de *Pinus durangensis* en vivero.**

Substrate FS-CB-TM (%) / Sustrato AF-CC-TM (%)	Total porosity (%) / Porosidad total (%)	Air-filled porosity (%) / Porosidad de aireación (%)	Water-holding capacity (%) / Capacidad de retención de agua (%)
50-25-25	60.0	39.2	19.5
35-25-40	55.2	36.2	18.9
0-50-50	55.5	32.8	22.6
Reference value* / Valor de referencia*	60 – 80	25 - 35	25 - 55

*Landis et al. (1990). FS = fresh uncomposted sawdust, CB = composted bark, TM = peat moss. Percentage calculated by volume.

*Landis et al. (1990). AF = aserrín fresco sin compostar, CC = corteza compostada, TM = turba de musgo. Porcentaje calculado en volumen.

Table 3. Substrates and fertilization doses used in the nursery production of *Pinus durangensis* seedlings.**Cuadro 3. Sustratos y dosis de fertilización utilizados en la producción de plantas de *Pinus durangensis* en vivero.**

Treatment / Tratamiento	Substrate component (%) / Componente del sustrato (%)			Multicote® (g·L ⁻¹)
	Fresh, uncomposted sawdust / Aserrín fresco sin compostar	Composted bark / Corteza compostada	Peat moss / Turba de musgo	
T1	50	25	25	6
T2	35	25	40	6
T3	0	50	50	6
T4	50	25	25	9
T5	35	25	40	9
T6	0	50	50	9
T7	50	25	25	12
T8	35	25	40	12
T9	0	50	50	12

The treatments were arranged in a completely randomized experimental design with a 3 × 3 factorial structure (three substrates and three fertilizer rates), with four replicates per treatment. Each replicate consisted of one expanded polystyrene forestry tray (15 cm in length and 4 cm in upper diameter) containing 77 cavities, each with a volume of 170 mL.

Seedling production

Seeding was carried out on August 21, 2020. Prior to sowing, the cavities of the trays were treated with a solution composed of 10 L of water, 4 L of vinyl sealer, and 0.6 kg of Cu (OH)₂ (copper hydroxide), to promote chemical pruning of the lateral roots of the seedlings. During the production process, irrigation was applied three times per week. The irrigation intensity depended on the prevailing climatic conditions, but efforts were made to ensure that moisture was consistently present in at least the lower two-thirds of the substrate volume within the container to avoid limiting plant growth. Additionally, weeding was performed monthly. During the first three months of seedling growth, fungus gnats (*Bradysia impatiens* Johannsen) were present in

Cobre (0.045 %) + Hierro (0.4 %) + Manganeso (0.055 %) + Molibdeno (0.01 %) + Zinc (0.06 %).

Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar, con arreglo factorial 3 x 3 (tres sustratos y tres dosis de fertilización), con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada repetición estuvo compuesta por una charola forestal de poliestireno expandido (15 cm de largo y 4 cm de diámetro superior) de 77 cavidades (170 mL por cavidad).

Producción de planta

La siembra se realizó el 21 de agosto de 2020. Previamente, las cavidades de las charolas se impregnaron con una solución compuesta por 10 L de agua, 4 L de sellador vinílico y 0.6 kg de Cu (OH)₂ (hidróxido de cobre), para propiciar la poda química de las raíces laterales de las plantas. Durante el proceso de producción se aplicaron tres riegos por semana. La intensidad de estos dependió de las condiciones climáticas prevaletientes, pero se buscó que siempre existiera humedad en el sustrato, en al menos las dos terceras partes inferiores del envase,

the substrate mixtures; to control them, the insecticide Denim® was applied every two weeks at a rate of 2 mL·L⁻¹ of water.

Evaluated variables

At 11 months of growth, 10 seedlings from the center of each experimental unit were evaluated. The substrate was removed from the root ball of each plant, and the following variables were measured: a) height, measured with a ruler graduated in millimeters, b) Root collar diameter, measured with a Truper® Caldi-6MP digital caliper (measurement range: 0.01 mm to 150 mm), c) Dry biomass; individual whole-plant samples were placed in kraft paper bags and dried in a forced-air oven (ECOSHEL®, model 9052) at 75 °C for 72 hours, then weighed on an analytical balance (Velab® VE-204) with a precision of 0.01 g. The Dickson Quality Index (DQI) was calculated using height, root collar diameter, and root, shoot, and total dry biomass.

The concentration and content of nutrients (N-P-K) were estimated from the total needle biomass of the sampled plants. For each treatment, 20 g of vegetative material were selected, obtained from 12 randomly chosen plants. The material was ground using a Retsch SM 300® mill and analyzed at the Laboratory of Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Plantas, Atmósfera (CENID-RASPA) of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Nitrogen (N) was quantified using the Kjeldahl method; phosphorus (P) by wet digestion with nitric-perchloric acid and colorimetry using ammonium metavanadate; and potassium (K) by atomic absorption spectrophotometry. Additionally, vector nomograms were developed to evaluate the effect of fertilization on aboveground dry biomass. This analysis considered the mean values per treatment for N content (X-axis), N concentration (Y-axis), and aboveground biomass (Z-axis), expressed in relative terms, with the 6 g·L⁻¹ fertilization dose used as the reference and normalized to 100.

Regarding costs, in June 2025, three commercial price quotes were obtained for the inputs used as substrates (raw sawdust, composted bark, and peat moss) and for the Multicote® 8 fertilizer from suppliers located in Victoria de Durango, Durango, Mexico. Based on these prices, the unit production costs were estimated for each substrate mixture and fertilization rate evaluated.

Statistical analysis

A database was compiled in Excel using the recorded growth data. To analyze the results, one-way analysis of variance (ANOVA) was conducted with the PROC GLM

para que no se limitara el crecimiento de las plantas; asimismo, cada mes se realizaron deshierbes. En los primeros tres meses de crecimiento de las plantas hubo presencia de mosca fungosa (*Bradysia impatiens Johannsen*) en las mezclas de sustrato; para su control, cada dos semanas se aplicó el insecticida Denim® en dosis de 2 mL·L⁻¹ de agua.

Variables evaluadas

A los 11 meses de crecimiento, se evaluaron 10 plantas de la parte central de cada unidad experimental. En cada planta se eliminó el sustrato del cepellón y se midieron las variables siguientes: a) altura, medida con regla graduada en milímetros, b) diámetro del cuello, medido con un vernier digital Truper® Caldi-6MP (rango de medición de 0.01 mm a 150 mm), c) biomasa seca; las muestras individuales de las plantas completas se colocaron en bolsas de papel estraza en un horno de ventilación forzada (ECOSHEL®, modelo 9052) a 75 °C durante 72 h, luego se pesaron en una balanza analítica (Velab® VE-204) con aproximación de 0.01 g. Con las variables altura, diámetro del cuello y biomasa de la raíz, aérea y total, se estimó el Índice de Calidad de Dickson (ICD).

La concentración y el contenido de nutrientes (N-P-K) se estimaron en el total de acículas de las plantas muestreadas. Se seleccionaron 20 g de material vegetativo por tratamiento, proveniente de 12 plantas seleccionadas al azar. El material se molió (molino Retsch SM 300®) y se analizó en el Laboratorio del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Plantas, Atmósfera (CENID-RASPA) del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), donde se cuantificó el nitrógeno (N) por el método Kjeldahl; el fósforo (P) por digestión húmeda, ácido nítrico perclórico y colorimetría con metavanadato de amonio, y el potasio (K) con espectrofotometría de absorción atómica. Además, se elaboraron nomogramas de vectores para conocer el efecto de la fertilización sobre la biomasa seca aérea. Dicho análisis consideró los valores medios por tratamiento del contenido de N (eje X), la concentración de N (eje Y) y la biomasa aérea (eje Z), expresados en medidas relativas, donde la dosis de fertilización de 6 g·L⁻¹ se tomó como testigo y se normalizó a 100.

Con relación a los costos, en el mes de junio de 2025 se consideraron tres cotizaciones comerciales de los insumos usados como sustratos (aserrín crudo, corteza compostada y turba de musgo) y del fertilizante Multicote® 8 en negocios ubicados en Victoria de Durango, Durango, México. Con estos precios se estimaron los costos unitarios de producción para cada mezcla de sustrato y dosis de fertilización evaluadas.

procedure in SAS 9.4® (SAS System, Inc. 2009). When significant differences were detected, Tukey's multiple comparison test ($p \leq 0.05$) was applied to determine the most effective treatments. The assumptions of data normality and homogeneity of variances were verified using the Shapiro-Wilk and Levene tests, respectively.

Results and Discussion

Morphological characteristics

The interaction between substrate and fertilization factors showed that treatment T7(50 % FS + 25 % CB + 25 % PM + 12 g·L⁻¹ of Multicote® controlled-release fertilizer) was the most favorable. This was followed by treatment T4, which used the same substrate mixture but a lower fertilizer dose (9 g·L⁻¹). Other treatments with positive results included T2 and T8, both consisting of 35 % FS + 25 % CB + 40 % PM, with fertilizer doses of 6 and 12 g·L⁻¹, respectively. The lowest values were recorded in treatment T3, which used a substrate of 50 % CB + 50 % PM combined with 6 g·L⁻¹ of Multicote® (Tables 4 and 5).

Based on morphological quality standards for forest species used in reforestation programs, the Mexican Standard NMX-AA-170-SCFI-2014 (Secretaría de Economía, 2014), in its normative Appendix C, states that *P. durangensis* seedlings aged 10 to 12 months should have a height between 10 and 25 cm and a minimum stem diameter of 4 mm. In this study, all treatments met the minimum criteria and exhibited the necessary morphological characteristics for use in reforestation; however, some treatments stood above others, allowing the identification of the most favorable substrate and fertilization combinations.

The results demonstrate that the use of FS and CB, along with PM, created favorable conditions in the root system for the growth of *P. durangensis*. Additionally, air temperature and humidity (15.9 to 23.4 °C and 36.7 to 57.5 %, respectively) were conducive to plant growth (Table 1). Porosity also played an important role

Análisis estadístico

Con la información de crecimiento registrada se elaboró la base de datos en Excel, a los cuales se realizaron análisis de varianza (ANOVA) de una vía, con el procedimiento PROC GLM de SAS 9.4® (SAS System, Inc. 2009). En las variables donde existieron diferencias significativas se aplicaron pruebas de comparación múltiple de medias por el método de Tukey ($p \leq 0.05$) para definir los mejores tratamientos. En todos los casos se comprobó el supuesto de normalidad de los grupos de datos y la homogeneidad de varianzas mediante la prueba Shapiro-Wilks y Levene, respectivamente.

Resultados y discusión

Características morfológicas

La interacción de los factores sustrato y fertilización muestra que el tratamiento T7 (50 % AF + 25 % CC + 25 % TM + 12 g·L⁻¹ del FLC Multicote®) fue el más favorable, seguido por el tratamiento T4 que tiene el mismo sustrato, pero con una dosis menor de fertilización (9 g·L⁻¹). Otros tratamientos con resultados favorables son el T2 y T8, compuestos por 35 % AF + 25 % CC + 40 % TM, con 6 y 12 g·L⁻¹ de fertilizante, respectivamente. Los valores menores se registraron en el tratamiento T3 con el sustrato compuesto por 50 % CC + 50 % TM más 6 g·L⁻¹ de Multicote® (Cuadros 4 y 5).

Con base en los estándares morfológicos de calidad de plantas de especies forestales utilizadas en los programas de reforestación, la Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2014 (Secretaría de Economía, 2014) en su Apéndice normativo C indica que las plantas de *P. durangensis* con edad de 10 a 12 meses deben tener una altura de 10 a 25 cm y diámetro mínimo de 4 mm. En este caso, todos los tratamientos cumplieron con esos indicadores mínimos y reunieron las características morfológicas necesarias para utilizarse en reforestaciones; sin embargo, algunos tratamientos destacaron sobre los demás, lo que permite considerar las combinaciones de sustrato y fertilización más favorables.

Table 4. ANOVA results for the variables evaluated in response to three substrate types and three fertilization rates during nursery growth of *Pinus durangensis*.

Cuadro 4. Resultados del ANOVA para las variables evaluadas en respuesta a tres sustratos y tres dosis de fertilización en el crecimiento de *Pinus durangensis* en vivero.

Factor	Height (cm)/ Altura (cm)	Diameter (mm)/ Diámetro (mm)	Total biomass (g)/ Biomasa total (g)	Dickson Quality Index/ Índice de calidad de Dickson
Substrate	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Fertilization rate	0.927	0.0003	0.0001	0.0004
Substrate*fertilization rate (Treatment)	0.002	0.0001	0.0001	0.0001

Table 5. Morphological variables of *Pinus durangensis* after 11 months of nursery growth under three substrate mixtures and three fertilization rates.**Cuadro 5. Variables morfológicas de *Pinus durangensis* después de 11 meses de crecimiento en vivero en tres mezclas de sustrato y tres dosis de fertilización.**

Treatment/ Tratamiento	Substrate FS + CB + PM (%) / Sustrato AF + CC + TM (%)	Fertilization (g·L ⁻¹) / Fertilización (g·L ⁻¹)	Height (cm) / Altura (cm)	Diameter (mm) / Diámetro (mm)	Total biomass (g) / Biomasa total (g)	Dickson Quality Index / Índice de calidad de Dickson
T1	50-25-25	6	17.3 ± 0.45 ab	5.6 ± 0.07 bcd	5.6 ± 0.14 ab	1.17 ± 0.03 abc
T2	35-25-40	6	17.1 ± 0.37 ab	5.6 ± 0.09 abc	5.8 ± 0.18 ab	1.23 ± 0.04 ab
T3	0-50-50	6	16.1 ± 0.39 ab	5.2 ± 0.08 d	4.8 ± 0.16 c	1.02 ± 0.04 c
T4	50-25-25	9	17.7 ± 0.46 a	5.9 ± 0.09 ab	6.2 ± 0.19 ab	1.32 ± 0.05 ab
T5	35-25-40	9	16.8 ± 0.32 ab	5.5 ± 0.10 bcd	5.5 ± 0.16 bc	1.12 ± 0.05 bc
T6	0-50-50	9	16.0 ± 0.30 ab	5.5 ± 0.10 cd	5.7 ± 0.12 ab	1.21 ± 0.04 ab
T7	50-25-25	12	17.2 ± 0.42 ab	6.0 ± 0.11 a	6.4 ± 0.18 a	1.36 ± 0.05 a
T8	35-25-40	12	17.1 ± 0.37 ab	5.8 ± 0.11 abc	6.1 ± 0.21 ab	1.28 ± 0.06 ab
T9	0-50-50	12	15.7 ± 0.40 b	5.5 ± 0.11 bcd	5.7 ± 0.16 ab	1.16 ± 0.04 abc

FS = fresh uncomposted sawdust, CB = composted bark, PM = peat moss. Different letters in the same column indicate significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.05$).

AF = aserrín fresco sin compostar, CC = corteza compostada, TM = turba de musgo. Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

in these results; only the substrate composed of 50 % FS + 25 % CB + 25 % PM met the recommended total porosity value, and the substrate with 50 % CB + 50 % PM was within the appropriate range for air porosity. However, the values for all three substrates did not exceed the recommended ranges for these variables by more than 5.5 % (Table 2). This indicates that the available irrigation water provided suitable conditions for assimilation by the plants, as observed by Castro-Garibay et al. (2019), where *Pinus greggii* var. *australis* showed the highest amount of available water (30 %) with a substrate of 60 % sawdust + 20 % bark + 20 % PM, compared to a substrate of 60 % PM + 20 % vermiculite + 20 % perlite, which had a value of 19 %.

For *P. durangensis*, Hernández-Velasco et al. (2022) reported that plants reached 22.6 cm in height and 5.2 mm in basal diameter using a substrate composed of 50 % base mix (28 % PM + 10 % agrolite + 12 % vermiculite) and 50 % CB, with a particle size of 3 mm, along with nutrition based on controlled-release fertilizer and soluble fertilizer irrigation, after 15 months of greenhouse growth. In that study, the plants exceeded the attributes stipulated in the Mexican Standard NMX-AA-170-SCFI-2014, likely because the plants were older compared to those in the present study (11 months). In *P. cooperi* Blanco, González et al. (2018) analyzed four substrates based on FS, CB, and PM with controlled-release fertilizer and found that the substrate containing 46 % PM + 54 % CB + 8 g·L⁻¹ of Multicote® contributed to better morphological performance. However, plants grown in the substrate

Los resultados demuestran que el uso de AF y CC, además de TM, crearon condiciones propicias en el sistema radical para el crecimiento favorable de *P. durangensis*. Por otra parte, la temperatura y humedad ambiental (15.9 a 23.4 °C y 36.7 a 57.5 %) fueron favorables para el crecimiento de las plantas (Cuadro 1). Asimismo, la porosidad desempeñó un papel fundamental en esos resultados; solo el sustrato de AF (50 %) + CC (25 %) + TM (25 %) cumplió con el valor recomendado de porosidad total y el sustrato 50 % CC + 50 % TM estuvo en el rango adecuado de porosidad de aireación, pero los valores de los tres sustratos no excedieron 5.5 % el rango recomendado de dichas variables (Cuadro 2). Esto indica que el agua de riego disponible aportó condiciones apropiadas para su asimilación en las plantas, tal como sucedió en Castro-Garibay et al. (2019), donde *Pinus greggii* var. *australis* tuvo la mayor cantidad de agua disponible (30 %) con un sustrato de aserrín (60 %) + corteza (20 %) + TM (20 %) con respecto al sustrato de TM (60 %) + vermiculita (20 %) + perlita (20 %), cuyo valor fue 19 %.

Para *P. durangensis*, Hernández-Velasco et al. (2022) reportaron que las plantas alcanzaron 22.6 cm de altura y 5.2 mm de diámetro basal con un sustrato compuesto por 50 % de mezcla base (28 % TM + 10 % de agrolita + 12 % de vermiculita) + 50 % CC, con granulometría de 3 mm, y nutrición a base de FLC y riegos con fertilizantes hidrosolubles, después de 15 meses de crecimiento en invernadero. En dicho estudio, las plantas sobrepasaron los atributos estipulados en la NMX-AA-170-SCFI-2014, debido a que la edad fue mayor respecto a las plantas

with 30 % PM + 20 % CB + 50 % FS + 8 g·L⁻¹ of Multicote® also exhibited favorable growth, and the substrate cost was 39.8 % lower.

Other positive experiences related to the use of sawdust as part of the substrate are reported by Aguilera-Rodríguez et al. (2016), where a mixture of 70 % composted pine sawdust, 15 % pine composted bark, and 15 % vermiculite allowed the production of *P. montezumae* Lamb. plants with appropriate morphological characteristics. Likewise, Hernández-Zarate et al. (2014), also working with *P. montezumae*, found that substrates composed of 70 % FS + 10 % PM + 10 % perlite + 10 % vermiculite and 10 % CB + 70 % FS + 10 % perlite + 10 % vermiculite resulted in similar and favorable morphological growth values compared to the control substrate (60 % PM + 20 perlite + 20 % vermiculite).

Regarding controlled-release fertilizers, Heras-Marcial et al. (2023) studied the effects of different doses on the growth of *P. patula* under nursery conditions and found that 8 g·L⁻¹ of 8-month Multicote Agri® combined with 4 and 6 g·L⁻¹ of 12-month Multicote® provided adequate morphological growth. N-P-K constitutes a group of essential nutrients that promote plant growth. N is fundamental in physiological processes such as photosynthesis and cell division; P is present in many compounds within plant cells, including sugars, phosphates, lipids, nucleic acids, and free nucleotides (Fathi, 2022; Taiz & Zeiger, 2006); and K contributes to the osmotic potential of cells and root tissues, facilitating cell elongation and plant turgor (Larriva Coronel, 2003). Undoubtedly, controlled-release fertilizers have been formulated based on plant needs, but they must be applied in the correct formulation and dosage. In the present study, Multicote® (18-6-12 N-P-K) at a dose of 9 g·L⁻¹ was the most appropriate based on its effectiveness and cost. Conversely, Martínez-Nevárez et al. (2023) evaluated doses of 4, 6, and 8 g·L⁻¹ of the same fertilizer and found that the intermediate dose was the most favorable for the quality of *P. cooperi* plants grown under nursery conditions.

Nutrient assimilation

The nutrient concentration in the needles of *P. durangensis* plants showed statistically significant differences ($p \leq 0.05$) among the three fertilization rates evaluated (Table 6). Regarding nitrogen (N), the primary element involved in height growth, the CRF at a rate of 12 g·L⁻¹ of substrate produced the highest nutrient concentration values. However, when only 6 and 9 g·L⁻¹ were applied, the concentrations still reached the recommended levels established by Landis et al. (2010) (1.3–3.5 %). In contrast, no significant differences ($p > 0.05$) were observed in P and K concentrations among

del presente estudio (11 meses). En *P. cooperi* Blanco, González et al. (2018) analizaron cuatro sustratos a base de AF, CC y TM con FLC y encontraron que el sustrato con 46 % TM + 54 % CC + 8 g·L⁻¹ de Multicote® contribuyó a que las plantas tuvieran mejor desempeño morfológico; no obstante, las plantas cultivadas en el sustrato con 30 % TM + 20 % CC + 50 % AF + 8 g·L⁻¹ de Multicote® también tuvieron crecimiento favorable y el costo del sustrato fue menor (39.8 %).

Otras experiencias positivas relacionadas con el uso de aserrín como parte del sustrato se reseñan en Aguilera-Rodríguez et al. (2016), donde la mezcla con 70 % de aserrín compostado de pino + 15 % de CC de pino + 15 % de vermiculita permitió la producción de plantas de *P. montezumae* Lamb. con características morfológicas apropiadas. Por su parte, Hernández-Zarate et al. (2014), también en *P. montezumae*, encontraron que los sustratos a base de 70 % AF + 10 % TM + 10 % de perlita + 10 % de vermiculita y 10 % CC + 70 % AF + 10 de perlita + 10 % de vermiculita propiciaron valores similares y favorables en el crecimiento morfológico de las plantas con respecto al sustrato testigo (60 % TM + 20 de perlita + 20 % de vermiculita).

Con respecto al FLC, Heras-Marcial et al. (2023) estudiaron los efectos de dosis sobre el crecimiento de *P. patula* en vivero y encontraron que 8 g·L⁻¹ de Multicote Agri® de 8 meses combinado con 4 y 6 g·L⁻¹ de Multicote® de 12 meses de liberación genera crecimiento morfológico adecuado. El N-P-K conforma un grupo de nutrientes esenciales que promueven el crecimiento de las plantas. El N es fundamental en los procesos fisiológicos como la fotosíntesis y la división celular; el P se encuentra en gran cantidad de compuestos de las células vegetales como los azúcares, fosfatos, lípidos, ácidos nucleicos y nucleótidos libres (Fathi, 2022; Taiz & Zeiger, 2006); y el K contribuye al potencial osmótico de las células y tejidos radicales, facilita el alargamiento celular y la turgencia de las plantas (Larriva Coronel, 2003). Sin duda, los FLC han sido elaborados con base en las necesidades de las plantas, solo que tienen que aplicarse en la formulación y dosis adecuada. En el presente estudio, el Multicote® (18-6-12 de N-P-K) en la dosis de 9 g·L⁻¹ fue el más apropiado con base en su efectividad y costo. En cambio, Martínez-Nevárez et al. (2023) evaluaron dosis de 4, 6 y 8 g·L⁻¹ del mismo fertilizante y encontraron que la dosis intermedia fue la más favorable en la calidad de la planta de *P. cooperi* producida en vivero.

Asimilación de nutrimentos

La concentración de nutrimentos en las acículas de las plantas de *P. durangensis* mostró diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$) entre las tres dosis de fertilización evaluadas (Cuadro 6). Con respecto

Table 6. Average nutrient concentration and content in the foliage of *Pinus durangensis* 12 months after sowing under nursery conditions.**Cuadro 6. Concentración y contenido promedio de nutrimentos en el follaje de *Pinus durangensis*, a los 12 meses de la siembra en condiciones de vivero.**

Nutrient/ Nutriente	Multicote® Fertilizer rates (g·L ⁻¹)/ Dosis del fertilizante Multicote® (g·L ⁻¹)			Reference value (%)*/ Valor de referencia (%)*
	6	9	12	
----- Nutrient concentration (%)/Concentración de nutrientes (%) -----				
N	1.32 ± 0.09 b	1.52 ± 0.07 b	1.95 ± 0.02 a	1.3-3.5
P	0.12 ± 0.00 a	0.13 ± 0.01 a	0.12 ± 0.01 a	0.2-0.6
K	0.55 ± 0.06 a	0.59 ± 0.05 a	0.64 ± 0.02 a	0.7-2.5
----- Nutrient concentration (mg·plant ⁻¹)/Contenido de nutrientes (mg·planta ⁻¹) -----				
N	4.40 ± 0.23 b	5.55 ± 0.48 b	7.63 ± 0.23 a	
P	0.40 ± 0.02 a	0.47 ± 0.03 a	0.49 ± 0.03 a	
K	1.80 ± 0.06 b	2.14 ± 0.11 ab	2.49 ± 0.08 a	

± Standard error of the mean. Means with different letters in the same row indicate significant differences according to Tukey's test ($p \leq 0.005$). *Landis et al. (2010).

± error estándar de la media. Medias con letras distintas en la misma fila indican diferencias significativas de acuerdo con la prueba de Tukey ($p \leq 0.005$). *Landis et al. (2010).

fertilization rates. Furthermore, the values obtained were below the minimum recommended for conifers (0.2-0.6 % P and 0.7-2.5 % K; Landis et al., 2010), which may be attributed to the fertilizer used containing lower amounts of P and K than required.

Based on morphological growth and nutrient assimilation in the plants, the 9 and 12 g·L⁻¹ rates of the eight-month Multicote® CRF are considered adequate to meet the necessary requirements for use. However, since they do not produce the minimum recommended concentrations of P and K, it is advisable to use a CRF with a higher percentage of these elements—for example, a 17-17-17 or 20-20-20 formulation.

The nutrient indicators obtained in this study showed higher nitrogen and lower phosphorus and potassium concentrations compared to those reported by González et al. (2018) for *P. cooperi*. These authors reported N-P-K concentrations of 1.0 %, 0.2 %, and 1.0 %, respectively, when using substrates composed of 50 % forest soil (FS) mixed with PM and CB in different ratios, and applying 8 g·L⁻¹ of Multicote®. Although these values were below the recommended levels, the plant quality indicators were satisfactory. Aguilera et al. (2021) produced *P. patula* seedlings using 11 substrates containing 10 % vermiculite + 10 % perlite + 20 % CB + 60 % sawdust from various conifer and broadleaf species, combined with 4 g·L⁻¹ of Multicote® 18-6-12 (N-P-K) and 4 g·L⁻¹ of Multicote® 12-24-12 (N-P-K). The average N-P-K concentrations obtained were 1.39 %, 0.29 %, and 0.49 %, respectively. Aguilera et al. (2021) also reported similar values—1.44 %, 0.22 %, and 0.51 % of N-P-K for the same species, using plants 20 to 30 cm tall grown from natural regeneration. In both growth conditions, the evaluated variables showed satisfactory results.

al nitrógeno (N), elemento principal en el crecimiento en altura, el FLC en dosis de 12 g·L⁻¹ de sustrato produjo los valores más altos de concentración de nutrientes; sin embargo, cuando solo se agregaron 6 y 9 g·L⁻¹ también se alcanzaron los valores recomendados por Landis et al. (2010) (1.3-3.5 %). En cuanto al P y K no existieron diferencias significativas ($p > 0.05$) en la concentración de dichos nutrimentos entre dosis de fertilización; además, los resultados fueron inferiores a los mínimos recomendados para coníferas (0.2-0.6 % P y 0.7-2.5 % K; Landis et al., 2010), lo cual puede atribuirse a que el fertilizante utilizado tiene menos P y K del requerido.

Con base en el crecimiento morfológico y la asimilación de nutrimentos en las plantas se considera que las dosis 9 y 12 g·L⁻¹ del FLC Multicote® de ocho meses cumplen los requerimientos necesarios para ser utilizados; sin embargo, debido a que no generan las concentraciones mínimas recomendadas de P y K, se debe buscar un FLC con mayor porcentaje de estos elementos en su formulación, tal vez un triple 17 o 20.

Los indicadores obtenidos en este ensayo son superiores en N e inferiores en P y K en comparación con lo reportado por González et al. (2018) en *P. cooperi*. Estos autores obtuvieron 1.0, 0.2 y 1.0 % de N-P-K cuando utilizaron sustratos con 50 % AF mezclados con TM y CC en diferentes proporciones, y 8 g·L⁻¹ de Multicote®; dichos valores son inferiores a los recomendados, a pesar de que los indicadores de calidad de la planta fueron satisfactorios. Por su parte, Aguilera et al. (2021) produjeron planta de *P. patula* en 11 sustratos que contenían 10 % de vermiculita + 10 % de perlita + 20 % de CC + 60 % de aserrín de varias especies de coníferas y latifoliadas, combinados con 4 g·L⁻¹ de Multicote® 18-6-12 de N-P-K + 4 g·L⁻¹ de Multicote® 12-24-12 de N-P-K; los

The graphical vector analysis showed a predominant direction in relation to the aboveground biomass. CRF at doses of 6 and 9 g·L⁻¹ of substrate promoted greater luxury consumption for all three nutrients. Luxury consumption is indicated by the shift of each vector toward the upper right corner in each graph; in other words, there was a greater increase in both the concentration and content of each nutrient (Figure 1). According to Ávila-Angulo et al. (2020), the goal of fertilization is to increase nutrient content in plant biomass, especially when plants are established in low-fertility soils, because this nutrient content acts as a reserve during the later field stage to support plant rooting while it adapts to the new site conditions.

Zamunér et al. (2012) found adequate mineral nutrient assimilation with 6 g·L⁻¹ of CRF (15-9-12 N-P-K) and nutrient excess with 9 g·L⁻¹ of Multicote®. In another study with *P. montezumae*, Aguilera et al. (2016) reported that high doses of Multicote® CRF (8 g·L⁻¹) maximize nitrogen concentration.

valores promedio obtenidos fueron 1.39, 0.29 y 0.49 % de N-P-K, respectivamente. Asimismo, Aguilera et al. (2021) obtuvieron valores similares con 1.44, 0.22, 0.51 % de N-P-K para la misma especie, pero con plantas de 20 a 30 cm de altura provenientes de regeneración natural; en este caso, los valores fueron satisfactorios en las variables evaluadas en las dos condiciones de crecimiento.

El análisis gráfico de vectores mostró una dirección predominante con relación a la biomasa aérea. Los FLC en dosis de 6 y 9 g·L⁻¹ de sustrato promovieron un mayor consumo de lujo para los tres nutrientes. El consumo de lujo se muestra por el desplazamiento de cada vector hacia la esquina superior derecha en cada gráfica; es decir, existió mayor incremento en la concentración y contenido de cada nutriente (Figura 1). De acuerdo con Ávila-Angulo et al. (2020), el objetivo de la fertilización es incrementar el contenido de nutrientes en la biomasa vegetal, principalmente cuando las plantas se establecen en suelos de baja fertilidad, ya que ese contenido de nutrientes sirve como reserva en la etapa posterior en

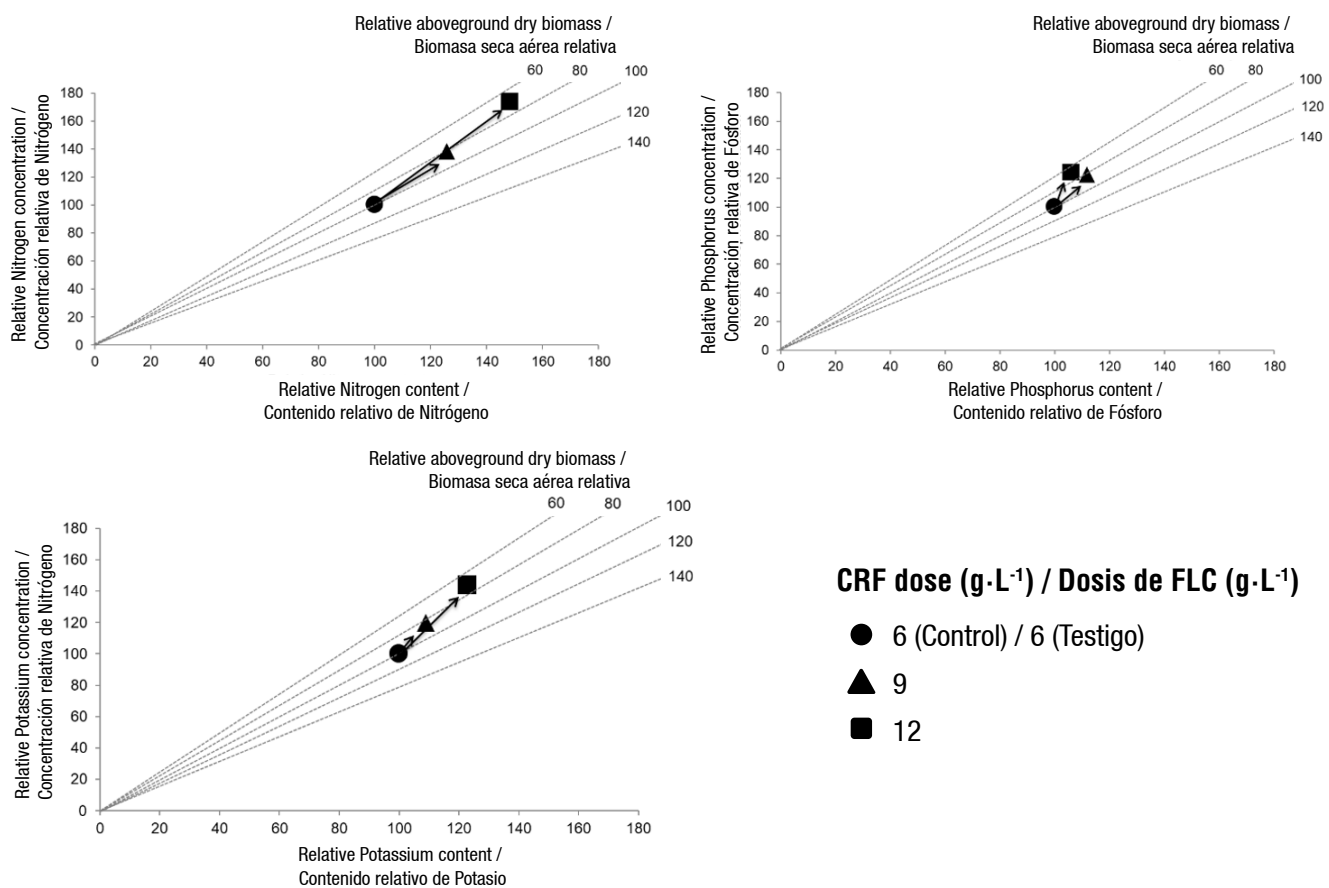


Figure 1. Vector diagram for nutrient analysis in the aboveground dry biomass of *Pinus durangensis* (Multicote® CFR) treated with controlled-release fertilizer at doses of 6, 9, and 12 g·L⁻¹ of substrate under nursery conditions.

Figura 1. Diagrama de vectores para el análisis nutrimental en la biomasa seca aérea de *Pinus durangensis* (FLC Multicote®) tratado con fertilizante de liberación controlada en dosis de 6, 9 y 12 g·L⁻¹ de sustrato en vivero.

Production costs due to substrate and fertilizer

According to commercial price quotes obtained in June 2025 in Victoria de Durango, Durango, Mexico (Table 7), the lowest costs for materials used as substrates and fertilizer corresponded to the plants in treatments T1 and T4 (0.49 and 0.57 MXN per plant, respectively). Treatments T7, T2, and T5 fall within an intermediate cost range of 0.62 to 0.72 MXN per plant, while the remaining treatments exceeded 0.77 MXN per plant, reaching a maximum value of 0.95 MXN per plant (T12); that is, nearly double the cost of the lowest-cost treatment (T1). This evaluation only includes the costs of substrates and fertilizer doses, which were the focus of the study; however, a comprehensive analysis should consider the entire production system, including infrastructure, production inputs, and labor.

The lower costs of treatments T1 and T4 were mainly influenced by the higher use of sawdust compared to peat moss, since the former is a low-cost material (0.15 MXN·L⁻¹) compared to peat moss (5.5 MXN·L⁻¹). Although the fertilizer dose used is another influencing factor, it was less determinant in the final cost per plant. Overall, the treatments that most promoted plant growth (T7, T4, and T2) fall within an intermediate cost range and are cheaper compared to treatment T6, which could be considered the control.

campo para el arraigo de la planta, mientras esta se adapta a las nuevas condiciones del sitio.

Zamunér et al. (2012) encontraron una asimilación adecuada de nutrientes minerales con 6 g·L⁻¹ de FLC (15-9-12 de N-P-K) y exceso de nutrientes con 9 g·L⁻¹ de Multicote®. En otro estudio con *P. montezumae*, Aguilera et al. (2016) encontraron que dosis altas del FLC Multicote® (8 g·L⁻¹) maximizan la concentración de N.

Costos de producción debido al sustrato y fertilizante

De acuerdo con las cotizaciones comerciales obtenidas en junio de 2025 en Victoria de Durango, Durango, México (Cuadro 7), los costos más bajos de los materiales utilizados como sustratos y fertilizante correspondieron a las plantas de los tratamientos T1 y T4 (0.49 y 0.57 MXN por planta, respectivamente). En un nivel intermedio se encuentran T7, T2 y T5 con valores de 0.62 a 0.72 MXN por planta, mientras que el resto de los tratamientos superaron el costo de 0.77 MXN con valor máximo de 0.95 MXN por planta (T12); es decir, cerca del doble con relación al tratamiento de costo menor (T1). En esta evaluación solo se integran los costos de los sustratos y las dosis de fertilizante, objetos de estudio; sin embargo, para un análisis integral habría que considerar todo el sistema de producción

Table 7. Costs of substrates and fertilizers used in the production of *Pinus durangensis* seedlings under nursery conditions.
Cuadro 7. Costos de sustratos y fertilizantes utilizados en la producción de plantas de *Pinus durangensis* en vivero.

Treatment / Tratamiento	Cost per component (MXN·L ⁻¹) / Costo por componente (MXN·L ⁻¹)			Substrate cost (1 + 2 + 3) = 4 (MXN·L ⁻¹) / Costo de sustrato (1 + 2 + 3) = 4 (MXN·L ⁻¹)	Fertilizer cost (5) (MXN·L ⁻¹) / Costo de fertilizante (5) (MXN·L ⁻¹)	Substrate cost + fertilizer (4 + 5) = 6 (MXN·L ⁻¹) / Costo de sustrato + fertilizante (4 + 5) = 6 (MXN·L ⁻¹)	Cost per plant (65.35*) (MXN) / Costo por planta (65.35*) (MXN)
	FS (1) / AF (1)	BC (2) / CC (2)	PM (3) / TM (3)				
T1	0.075	0.33	1.37	1.78	0.84	2.62	0.49
T2	0.053	0.33	2.20	2.58	0.84	3.42	0.64
T3	0	0.65	2.75	3.40	0.84	4.24	0.78
T4	0.075	0.33	1.37	1.78	1.26	3.04	0.57
T5	0.053	0.33	2.20	2.58	1.26	3.84	0.72
T6	0	0.65	2.75	3.40	1.26	4.66	0.87
T7	0.075	0.33	1.37	1.78	1.68	3.46	0.65
T8	0.053	0.33	2.20	2.58	1.68	4.26	0.80
T9	0	0.65	2.75	3.40	1.68	5.08	0.95

A substrate volume of 170 mL per cavity was considered. With 1 L of substrate, 5.88 cavities can be filled; however, due to substrate compaction when filling the tray, an additional 10 % substrate was accounted for. Therefore, 1 L of substrate fills 5.35 cavities, which corresponds to the number of plants to be produced. The costs of each input are as follows: 0.15 MXN·L⁻¹ for fresh uncomposted sawdust, 1.3 MXN·L⁻¹ for composted bark, 5.5 MXN·L⁻¹ for peat moss, and 140 MXN·L⁻¹ for Multicote®8. FS = fresh uncomposted sawdust; CB = composted bark; PM = peat moss.

Se consideró un volumen de 170 mL por cavidad. Con 1 L de sustrato se llenan 5.88 cavidades; sin embargo, debido a la compactación del sustrato al llenar la charola, se consideró 10 % más de sustrato adicional. Por ello, con 1 L de sustrato se llenan 5.35 cavidades, equivalentes al número de plantas por producir. Los costos de cada insumo son: 0.15 MXN·L⁻¹ aserrín fresco sin compostar, 1.3 MXN·L⁻¹ corteza compostada, 5.5 MXN·L⁻¹ turba de musgo y 140 MXN·kg⁻¹ en el caso de Multicote®8. AF = aserrín fresco sin compostar; CC = corteza compostada; TM = turba de musgo.

The results indicate that using sawdust in a higher ratio than peat moss produces a lower-cost substrate and plants with good quality (Table 5), which is consistent with González et al. (2018), who studied the costs of substrate mixtures for *P. cooperi* including FS, CB, and PM. Those authors found a 39.8 % difference in substrate cost (50 % FS + 20 % CB + 30 % PM vs. 46 % PM + 54 % CB), due to the inclusion of sawdust—a low-cost material—and the reduced proportion of peat moss, which is more expensive. A similar outcome was reported by Martínez-Casas et al. (2024), who found that costs for *P. durangensis* were reduced by 28.4 % when using Multicote® fertilizer combined with equal parts PM and bark, and by 34.6 % with the combination of PM (50 %) + bark (25 %) + sawdust (25 %) compared to the use of PM (50 %) + vermiculite (25 %) + perlite (25 %).

Currently, in Mexico, sawdust and bark are materials that are available and abundant in areas with commercial timber harvesting; these residues amount to more than 690 000 m³·year⁻¹, representing between 12 % and 14 % of the annual sawn volume (Mateo Sánchez et al., 2023). This data reinforces the point made by Buamscha et al. (2012), who state that, in addition to producing quality seedlings, the best substrate is one that is readily available, located close to the nursery, and low in cost.

Conclusions

The incorporation of raw sawdust and composted pine bark into mixtures with peat moss results in substrates with suitable characteristics for the nursery production of high-quality *Pinus durangensis* seedlings, while concurrently reducing production costs. A substrate mixture comprising 50 % fresh sawdust, 25 % composted bark, 25 % peat moss, and 9 g·L⁻¹ of Multicote® controlled-release fertilizer (18-6-12 N-P-K) yielded seedlings exhibiting morphological quality traits in compliance with Appendix C of the Mexican Standard NMX-AA-170-SCFI-2014. Controlled-release fertilizer doses of 9 and 12 g·L⁻¹ with an eight-month release period enhanced seedling quality most effectively; nevertheless, the 9 g·L⁻¹ dose represents a more cost-efficient option, also complying with such standard.

Conflict of interest declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest or known personal relationships that could have influenced the research presented in this article.

End of English version

que incluya la infraestructura, insumos de producción y mano de obra.

Los costos menores de los tratamientos T1 y T4 fueron influenciados principalmente por la utilización del aserrín en mayor proporción que la turba de musgo, ya que el primero es un material de bajo costo (0.15 MXN·L⁻¹) comparado con la turba (5.5 MXN·L⁻¹); aunque la dosis del fertilizante usada es otro factor de influencia, este criterio fue menos determinante en el costo final por planta. En general, los tratamientos que más favorecieron el crecimiento de las plantas (T7, T4 y T2) se ubican en un lugar intermedio en los costos y son económicos respecto al tratamiento T6 que pudiera considerarse como testigo.

Los resultados demuestran que el uso de aserrín, en mayor proporción que la turba, genera sustrato y plantas de menor costo y de buena calidad (Cuadro 5), lo que concuerda con González et al. (2018), quienes estudiaron los costos de mezclas de sustratos en *P. cooperi* que incluían AF, CC y TM. Dichos autores obtuvieron diferencias en el costo de los sustratos de 39.8 % (50 % AF + 20 % CC + 30 % TM vs. 46 % TM + 54 % CC), debido a la inclusión de aserrín, que es un material económico, y a la disminución de la proporción de la turba cuyo precio es mayor. Lo mismo sucedió con Martínez-Casas et al. (2024), quienes encontraron que los costos en *P. durangensis* se redujeron 28.4 % cuando se utilizó el fertilizante Multicote® más los sustratos TM y corteza en partes iguales, y 34.6 % con la combinación de TM (50 %) + corteza (25 %) y aserrín (25 %) con relación al uso de TM (50 %) + vermiculita (25 %) + perlita (25 %).

Actualmente, en México, el aserrín y la corteza son materiales disponibles y abundantes en zonas donde existen aprovechamientos forestales maderables; dichos residuos constituyen más de 690 000 m³·año⁻¹ que representan entre 12 a 14 % del volumen aserrado (Mateo Sánchez et al., 2023). Estos datos refuerzan lo indicado por Buamscha et al. (2012), quienes mencionan que adicional a la obtención de plantas de calidad, el mejor sustrato será el que esté disponible, cercano al vivero y de menor costo.

Conclusiones

La incorporación de aserrín crudo y corteza de pino compostada a mezclas con turba de musgo genera sustratos con características apropiadas para la producción de plantas de calidad de *Pinus durangensis* en vivero y, a su vez, reduce los costos de producción. La mezcla de sustrato a base de 50 % aserrín fresco + 25 % corteza compostada + 25 % turba de musgo + 9 g·L⁻¹ de FLC Multicote® (18-6-12 de N-P-K) produjo planta con características morfológicas de calidad de conformidad con el apéndice C de la Norma NMX-AA-170-SCFI-2014.

Referencias / Referencias

- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Martínez-Trinidad, T., & Ordáz-Chaparro, V. M. (2016). Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia*, 50(1), 107–118. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30243765008>
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Trejo-Téllez, I. J., & Ordáz-Chaparro, V. M. (2021). Sustratos con aserrín de coníferas y latifoliadas para producir plantas de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Agrociencia*, 55(8), 719–732. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i8.266>
- Aguilera-Rodríguez, M., Aldrete, A., Sánchez-Velázquez, J. R., & Prieto-Ruiz J. A. (2023). Instalaciones e insumos para la producción. In 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. Estado de México, México. https://www.researchgate.net/publication/379911701_Calidad_de_planta_en_viveros_forestales
- Ávila-Angulo, M. L., Gómez-Guerrero, A., Aldrete, A., Vargas-Hernández, J. J., López-López, M. A., & Hernández-Ruiz, J. (2020). Does fertilization hardening improve the morphometric and physiological characteristics of *Pinus rudis* Endl. seedlings? *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 141–153. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.04.031>
- Buamscha, M. G., Contardi, L. T., Kasten, D. R., Enricci, J. A., Escobar, R. R., Gonda, H. E., Jacobs, D. F., Landis, T. D., Luna, T., Mexal, J. G., & Wilkinson, K. M. (2012). *Producción de plantas en viveros forestales*. Buenos Aires: CIEFAP. http://ciefap.org.ar/documentos/pub/Produc_plantas_viv.pdf
- Burney, O., Aldrete, A., Alvarez R. R., Prieto, R. J. A., Sánchez, V. J. R., & Mexal, J. G. (2015). México-Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, 113, 404–413. <http://doi.org/10.5849/jof.14-007>
- Castro-Garibay, S. L., Aldrete, A., López-Upton, J., & Ordáz 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>
- Cervantes-Rodríguez, N., Prieto-Ruiz, J. A., Rosales-Mata, S., & Félix-Herrán, J. A. (2018). Crecimiento de mezquite en vivero bajo diferentes condiciones de sustrato, riego y retenedores de humedad. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(1), 17–31. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-0182018000100017&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Comisión Nacional Forestal México (CONAFOR). (2021). *El sector forestal mexicano en cifras 2020*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/644967/El_Sector_Forestal_Mexicano_en_Cifras_2020_compressed1_.pdf
- Comisión Nacional Forestal México (CONAFOR). (2023). *Estado que guarda el sector forestal en México 2023*. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estado-que-guarda-el-sector-forestal-en-mexico-2023>
- Las dosis de 9 y 12 g·L⁻¹ de Multicote® con liberación controlada para ocho meses favorecen la calidad de la planta producida en mayor medida; sin embargo, la dosis de 9 g·L⁻¹ implica un costo menor.
- ### Declaración de conflictos de intereses
- Los autores declaramos que no tenemos conflictos de intereses económicos ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en la investigación presentada en este artículo.
- ### Fin de la versión en español
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL). (2018). *Fichas de monitoreo y evaluación 2017-2018 de los programas y las acciones federales de desarrollo social*. <https://www.coneval.org.mx/EvaluacionDS/PP/CEIPP/IEPSM/Documents/Fichas-Monitoreo-y-Evaluacion-2017-2018.pdf>
- Fathi, A. (2022). El rol del nitrógeno (N) en el crecimiento de las plantas, pigmentos de fotosíntesis y eficiencia del empleo del nitrógeno. *Agrisost*, 28, 1–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8164584>
- Gayosso-Rodríguez, S., Borges-Gómez, L., Villanueva-Couoh, E., Estrada-Botello, M. A., & Garruña-Hernández, R. (2016). Sustratos para producción de flores. *Agrociencia*, 50, 617–631. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1237/1237>
- 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 plantas de *Pinus cooperi* Blanco en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48), 204–226. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v8i48.125>
- Grossnickle, S. C. (2018). Seedling establishment on a forest restoration site – An ecophysiological perspective. *Reforesta*, 6, 110–139. <https://doi.org/10.21750/REFOR.6.09.62>
- Grossnickle, S. C., & MacDonald, J. E. (2018). Seedling quality: History, application, and plant attributes. *Forests*, 9(283), 1–23. <https://doi.org/10.3390/f9050283>
- Haase, D. L., & Davis, A. S. (2017). Developing and supporting quality nursery facilities and staff are necessary to meet global forest and landscape restoration needs. *Reforesta*, 4, 69–93. <https://doi.org/10.21750/REFOR.4.06.45>
- Heras-Marcial, M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2023). Influence of fertilization on survival and growth of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under nursery and field conditions. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 29(1), 3–14. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.019>
- Hernández-Velasco, J., Hernández-Díaz, J. C., Vargas-Hernández, J. J., Hipkins, V., Prieto-Ruiz, J. A., Pérez-Luna, A., & Wehenkel, C. (2022). Natural hybridization in seed stands of seven Mexican *Pinus* species. *New Forests*, 53, 487–509. <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09868-9>

- Hernández-Zarate, L., Aldrete, A., Ordaz-Chaparro, V. M., López-Upton, J., & López-López, M. A. (2014). Crecimiento de *Pinus montezumae* Lamb. en vivero influenciado por diferentes mezclas de sustratos. *Agrociencia*, 48(6), 627–637. <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v48n6/v48n6a5.pdf>
- Landis, T. D., Tinus, R. W., McDonald, S. E., & Barnett, J. P. (1990). *Containers and growing media*. Vol. 2. *The container tree nursery manual*. Agric. Handbook. Washington, DC, USA: USDA Forest Service. <https://rnr.net/publications/ctnm/volume-2>
- Landis, T. D., & Dumroese, R. L. (2009). Using polymer-coated controlled-release fertilizers in the nursery and after outplanting. *Forest Nursery Notes*, 29(1), 5–12. http://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2009_landis_t001.pdf
- Landis, T. D., Dumroese, R. L., & Haase, D. L. (2010). Seedling processing, storage, and outplanting. In T. D. Landis, R. W. Tinus, S. E. McDonald, & J. P. Barnett, (Eds.), *The container tree nursery manual* (pp. 1-200). USDA Forest Service. https://www.researchgate.net/publication/272817540_The_container_tree_nursery_manual_volume_7_seedling_processing_storage_and_outplanting
- Larriba Coronel, N. (2003). Síntesis de la importancia del Potasio en el suelo y plantas. *La Granja*, 2(1), 23-24. <https://revistas.ups.edu.ec/index.php/granja/article/view/2.2003.09>
- Madrid-Aispuro, R. E., Prieto-Ruiz, J. A., Aldrete, A., Hernández-Díaz, J. C., Wehenkel, Ch., & Chávez-Simental, J. A. (2021). Crecimiento de *Pinus cembroides* Zucc. en vivero en diversos sustratos y fertilizantes. *Agrociencia*, 54(4), 539–554. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2051/2005>
- Martínez-Casas, R., García-Rodríguez, J. L., Salcido-Ruiz, S., Goche-Télles, J. R., & Prieto-Ruiz, J. A. (2024). Production of *Pinus durangensis* Mart. under different substrate and mycorrhizal inoculation conditions in nursery. *Agrociencia*, 58(4), 486–499. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i4.2960>
- 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>
- Mateo Sánchez, J. J., Suarez Islas, A., Capulín Grande, J., Pacheco Trejo, J., González de la Rosa, L., & Reyes Santamaría Ma. I. (2023). Utilización de desperdicios de la industria primaria de la madera para producción de planta en vivero. *Boletín de Ciencias Agropecuarias del ICAP*, 9, 26-33. <https://doi.org/10.29057/icap.v9iEspecial.8977>
- Prieto Ruiz, J. A., Aldrete, A., Sánchez V., J. R., & Hernández D., J. C. (2016). Antecedentes sobre la reforestación en México. In J. A. Prieto Ruiz, & J. R. Goche Télles (Eds.), *Las reforestaciones en México: problemática y alternativas de solución* (pp. 14-22). Universidad Juárez del estado de Durango. https://www.researchgate.net/publication/378742653_Las_reforestaciones_en_Mexico_PROBLEMATICA_Y_ALTERNATIVAS_DE_SOLUCION
- Reyes Rodríguez, C. F., Rosas Chavoya, M., López Serrano, P. M., Prieto Ruiz, J. A., Hinojosa Espinoza, F., & Vega Nieva, D. (2024). Análisis de la temperatura superficial en las áreas verdes de la ciudad de Durango, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 15(81), 83-109. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322024000100083
- 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>
- Sánchez-Hernández, R. S., Quiñones-Pérez, C. Z., Hernández-Díaz, J. C., Prieto-Ruiz, J. A., & Wehenkel, C. (2022). Field trials to assess the growth, survival, and stomatal densities of five Mexican Pine species and their hybrids under common plantation conditions. *Forests*, 13(11), 1791. <https://doi.org/10.3390/f13111791>
- SAS Institute. (2009). SAS/STAT® 9.2. User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, EEUU. <http://support.sas.com/documentation/cdl/en/statugmcmc/63125/PDF/default/statugmcmc.pdf>
- Secretaría de Economía. (2014). *Norma Mexicana NMX-AA-170-SCFI-2014: Certificación de operación de viveros forestales*. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/DO3430.pdf>
- Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente (SEMARNAT). (2021). *Anuario estadístico de la producción forestal 2018*. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal* (3.ª ed.). Sunderland, MA, USA: Universidad Jaume.
- Villar Salvador, P., Peñuelas Rubira, J. L., & Nicolás Peragón, J. L. (2021). La calidad de los materiales de reproducción. Capítulo 16. In J. Pemán García, R. M. Navarro Cerrillo, M. A. Prada Sáez, & R. Serrada Hierro (Eds.), *Bases técnicas y ecológicas del proyecto de repoblación forestal* (pp. 781–822). Madrid, España. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-restauracion/basestecnicasyecologicasdelproyectoderepoblacionforestal-tomo1_tcm30-534170.pdf
- 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*, 18(2), 239–245. <https://doi.org/10.1590/s0104-77602012000200008>