e-ISSN: 2007-4018 / ISSN print: 2007-3828

Scientific article https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.08.030

Morphological quality of sacred fir (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. et Cham.) seedlings under fertigation conditions

Calidad morfológica de plantas de oyamel (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. et Cham.) en condiciones de fertirriego

Isabel E. Bernardino-Pérez[1]; Gerardo Rodríguez-Ortiz[1*]; José R. Enríquez-del Valle[1]; Pablo Espinoza-Zúñiga[2]; Gisela V. Campos-Angeles[1]; Ernesto Hernández-Santiago[1]

[1]Tecnológico Nacional de México (TecNM), Campus Valle de Oaxaca (ITVO), División de Estudios de Posgrado e Investigación. Exhacienda de Nazareno s/n, San Jesús de Nazareno. C. P. 71233. Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.

[2]Tecnológico Nacional de México (TecNM), Campus Valle de Oaxaca (ITVO), extensión Santo Domingo Ixcatlán. C. P. 71146. Tlaxiaco, Oaxaca, México.

*Corresponding author: gerardo.ro@voaxaca.tecnm.mx

Abstract

Introduction. Climate change scenarios project a reduction in the *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. habitat. Therefore, producing high-quality seedlings capable of adapting to and developing under new establishment conditions is essential.

Objective. To evaluate the morphological quality of *A. religiosa* seedlings under four doses of Steiner nursery conditions.

Materials and methods. The experiment was conducted using a completely randomized design with four treatments based on doses of Steiner's universal nutrient solution (150 mL·seedling^{-1} every seven days): T1 = 40 %, T2 = 60 %, T3 = 80 % and T4 = 100 %, plus a control. Plant height, root collar diameter, and number of branches were recorded monthly. At four months, destructive sampling was conducted to determine 21 morphological indicators. Analysis of variance and Ducan´s multiple range test were performed at $\alpha = 0.05$.

Results. After four months of evaluation, specific leaf weight, the lignification index, and branch fresh weight showed significant differences ($p \leq 0.05$); the 40 % and 60 % Steiner solution doses improved these indicators. During the monthly assessments, plant height and root collar diameter differed significantly. The attributes of *A. religiosa* seedlings fertigated with the 40 % Steiner solution were of high quality.

Conclusions. The high morphological quality of sacred fir seedlings fertigated with 40 % Steiner solution suggests that they will show better performance after outplanting.

Keywords: plant quality, root collar diameter, lignification index, specific leaf weight, Steiner solution.

Resumen

Introducción. Los escenarios del cambio climático proyectan una reducción del hábitat de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. Por ello, es fundamental la obtención de plantas de calidad capaces de adaptarse y desarrollarse en nuevas condiciones de establecimiento.

Objetivo. Evaluar la calidad morfológica de plantas de *A. religiosa* bajo cuatro dosis de solución Steiner en condiciones de vivero.

Materiales y métodos. El experimento se hizo bajo un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos de acuerdo con las dosis de la solución universal Steiner (150 mL·planta^{-1} cada siete días): T1 = 40 %, T2 = 60 %, T3 = 80 % y T4 = 100 %, más un testigo. La altura de la planta, diámetro de cuello y número de ramas se registraron cada mes y a los cuatro meses se hizo un muestreo destructivo para determinar 21 indicadores morfológicos. Se hicieron análisis de varianza y pruebas de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$).

Resultados. Después de cuatro meses de evaluación, el peso específico foliar, el índice de lignificación y el peso verde de ramas mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$); las dosis de 40 % y 60 % de solución Steiner mejoraron dichos indicadores. Durante los muestreos mensuales, la altura de planta y diámetro de cuello se diferenciaron significativamente. Los atributos de *A. religiosa* con fertirriego de 40 % de solución Steiner fueron de calidad alta.

Conclusiones. La calidad morfológica alta de las plantas de oyamel, fertirrigadas con 40 % de la solución Steiner, sugiere que estas mostrarán mejor desempeño cuando sean llevadas al sitio de plantación.

Palabras clave: calidad de planta, diámetro de cuello, índice de lignificación, peso específico foliar, solución Steiner.

Please cite this article as follows (APA 7): Bernardino-Pérez, I. E., Rodríguez-Ortiz, G., Enríquez-del Valle, J. R., Espinoza-Zúñiga, P., Campos-Angeles, G. V., & Hernández-Santiago, E. (2026). Morphological quality of sacred fir (*Abies religiosa* [Kunth] Schltdl. et Cham.) seedlings under fertigation conditions. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 32,* e25030. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2025.08.030

Received: August 23, 2025 | **Accepted:** September 3, 2026 | **Published online:** November 12, 2026

RCHSCFA

https://revistas.chapingo.mx/forestales

Introduction

Forest restoration has emerged as a key strategy for the recovery of degraded areas through the establishment of high-quality nursery-grown seedlings that provide successful germplasm for succession processes (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). In commercial forest plantations and reforestation programs, the establishment of seedlings with high morphological, genetic, physiological, biological, and sanitary quality is essential to ensure project success (Burney et al., 2015; Escobar-Alonso & Rodríguez-Trejo, 2019; Muñoz-Flores et al., 2015). Consequently, survival rates increase and growth improves, even in low-productivity areas (Pineda-Ojeda et al., 2020). Low survival rates (<40 %) prevent reforestation programs from achieving their objectives, whereas survival rates should exceed >80 % to be considered very high (Flores-García et al., 2021).

Seedling quality refers to the outstanding characteristics that determine greater survival, vigor, adaptation, and growth under the climatic and edaphic conditions of the planting site (Grossnickle & MacDonald, 2018; Kuan-Hung et al., 2019). Morphological quality can be assessed based on height, root collar diameter, root system, height-to-root collar diameter ratio, slenderness index, biomass, and the presence of mycorrhizae (Escobar-Alonso & Rodríguez-Trejo, 2019). The shoot height-to-root length ratio and Dickson Quality Index are also important, although they require time and resources because they involve destructive sampling (Ellison et al., 2016).

The establishment of a plantation also requires consideration of specific factors, such as container shape, type, and size; substrate; and fertilization and irrigation methods, which also influences seedling development and quality (Heras-Marcial et al., 2023). Nutrient solutions optimize the nutritional requirements of seedlings because they contain essential elements for enhanced growth and development. The use of a specific nutrient solution and its potential dilution determine the total amount of nutrients that should be adjusted according to the seedling's developmental stage (Cruz-Crespo et al., 2014). However, nutrient uptake is conditioned by genotype, aboveground and belowground components, and seedling age (Gandica-Omaña & Peña, 2015). Therefore, analyzing nutrient solution compositions is essential to achieve maximum production capacity.

Steiner's universal nutrient solution provides concentrations of macronutrients (N, P, K, Ca, Mg, and S) and is most frequently used in agricultural research (López-Gómez et al., 2017; Ramírez-Vargas, 2019). The

Introducción

La restauración forestal surge como una estrategia clave para la recuperación de áreas degradadas, mediante el establecimiento de plantas de calidad provenientes de vivero que proporcionen germoplasma exitoso en los procesos de sucesión (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2022). En plantaciones forestales comerciales y reforestaciones es imprescindible el establecimiento de plantas de alta calidad morfológica, genética, fisiológica, biológica y sanitaria que garanticen el éxito del proyecto (Burney et al., 2015; Escobar-Alonso & Rodríguez-Trejo, 2019; Muñoz-Flores et al., 2015). De esta manera la tasa de supervivencia aumenta y el desarrollo mejora, incluso en zonas de baja productividad (Pineda-Ojeda et al., 2020). Los índices bajos de supervivencia (<40 %) provocan que no se alcancen los objetivos de las reforestaciones, los cuales deben ser >80 % para una supervivencia muy alta (Flores-García et al., 2021).

La calidad se refiere a las características sobresalientes de las plantas que determinan una mayor supervivencia, vigor, adaptación y crecimiento en las condiciones climáticas y de suelo en el sitio de plantación (Grossnickle & MacDonald, 2018; Kuan-Hung et al., 2019). La calidad morfológica se puede determinar mediante la altura, diámetro de cuello, sistema radical, relación altura-diámetro de cuello, índice de robustez, biomasa y presencia de micorrizas (Escobar-Alonso & Rodríguez-Trejo, 2019). La relación altura de la planta/longitud de raíz e índice de Dickson también son importantes, aunque consumen tiempo y recursos, ya que requieren de muestreo destructivo (Ellison et al., 2016).

En el establecimiento de una plantación también se deben considerar aspectos específicos como forma, tipo y tamaño de contenedor, sustrato, método de fertilización y riego que también influyen en el desarrollo y calidad de planta (Heras-Marcial et al., 2023). Las soluciones nutritivas optimizan los requerimientos nutricionales de las plantas, ya que contienen elementos indispensables para un mayor crecimiento y desarrollo. La aplicación de una solución específica y su posible dilución determina la cantidad total de nutrimentos que debe ajustarse a la fase de desarrollo de la planta (Cruz-Crespo et al., 2014). No obstante, la asimilación de nutrientes está condicionada por el genotipo, parte aérea y subterránea, y la edad de las plantas (Gandica-Omaña & Peña, 2015); por ello, es fundamental analizar las composiciones de soluciones nutritivas para lograr la capacidad máxima de producción.

La solución universal de Steiner aporta concentraciones de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, y S) y se utiliza con mayor frecuencia en investigaciones agrícolas (López-Gómez et al., 2017; Ramírez-Vargas, 2019).

ionic proportions ensure adequate plant development; the solution is often used as a standard because of its nutrient richness, ionic balance, and rapid uptake, which improve yield, growth, and fruiting (Luna-Fletes et al., 2021). In contrast, studies of this type involving perennial plants are scarce, such as the study by Román-Jiménez et al. (2004), who evaluated *P. greggii* Engelm. under greenhouse and fertigation conditions using Steiner's solution. These authors determined that morphological indices provide an initial approach for analyzing nutrient balance in forest species and suggested the need to evaluate specific fertilization doses to achieve physiological and operational balance in seedling production.

Abies religiosa (Kunth) Schltdl. et Cham. (sacred fir) is a species native to the high mountains of Mexico, where it grows at elevations ranging from 2100 and 3500 m (CONAFOR, 2014; Farjon, 2013) and develops on well-drained sites with annual precipitation exceeding 1000 mm. The species can be found in pure or mixed stands with *Pinus montezumae* Lamb., *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* Beissn., *P. hartwegii* Lindl., *Alnus acuminata* Kunth., *Prunus serotina* Ehrh., *Quercus* spp. and *Arbutus* spp. (Farjon, 2013).

In Mexico, research on *A. religiosa* regarding seedling quality indicators under nursery conditions is scarce or nonexistent. The only study on this species related to nursery growth is that of Gallardo-Salazar et al. (2019), who used growth variables (height, root collar diameter, and root length) and biomass variables (shoot and root dry weight, total dry weight, root-to-shoot dry weight ratio, Dickson Quality Index, and slenderness index) to predict survival rates after field establishment. Other studies in the country have focused on provenance selection, with no clear growth patterns identified in relation to provenance origin (Benavides-Meza et al., 2011). Meanwhile, studies by Cruzado-Vargas et al. (2020, 2025) reported a 75 % survival rate under nursery conditions and indicated that the upper and lower elevation extremes of *A. religiosa* provenances showed the most pronounced genetic variation. Cruzado-Vargas et al. (2025) and Manzanilla-Quijada et al. (2024) reported that sacred fir populations located at the lower elevational limit of their distribution may experience water stress and higher mortality rates under future scenarios. Therefore, it is essential to produce high-quality seedlings capable of adapting to and developing under new establishment conditions.

In this context, the objective of the present study was to evaluate the morphological quality of *A. religiosa* seedlings under fertigation with four doses of Steiner solution under nursery conditions.

Las proporciones de los iones aseguran que las plantas puedan desarrollarse de forma adecuada; con frecuencia, se emplea como estándar debido a su riqueza en nutrientes, balance iónico y absorción rápida, lo que mejora el rendimiento, crecimiento y fructificación (Luna-Fletes et al., 2021). En contraste, estudios de este tipo en plantas perennes son escasos, como el caso de Román-Jiménez et al. (2004), quienes evaluaron *P. greggii* Engelm. en condiciones de invernadero y fertirrigación con solución Steiner. Dichos autores determinaron que los índices morfológicos representan un primer enfoque para analizar el balance de nutrientes en especies forestales y sugieren la necesidad de evaluar dosis específicas de fertilización para alcanzar un equilibrio fisiológico y operativo en la producción de planta.

Abies religiosa (Kunth) Schltdl. et Cham. (oyamel) es una especie originaria de las montañas altas de México, crece en altitudes entre 2100 y 3500 m (CONAFOR, 2014; Farjon, 2013) y se desarrolla en terrenos bien drenados con precipitaciones superiores a 1000 mm. La especie puede encontrarse en masas puras o mezcladas con *Pinus montezumae* Lamb., *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* Beissn., *P. hartwegii* Lindl., *Alnus acuminata* Kunth., *Prunus serotina* Ehrh., *Quercus* spp. y *Arbutus* spp. (Farjon, 2013).

En México, la investigación de *A. religiosa* respecto a los indicadores de calidad de planta en vivero es escasa o nula. El único estudio sobre esta especie, relacionado con el crecimiento en vivero, es el de Gallardo-Salazar et al. (2019), quienes utilizaron variables de crecimiento (altura, diámetro del cuello y longitud de raíz) y de biomasa (peso seco del brote y raíz, peso seco total, relación peso seco de la raíz/brote, índice de calidad de Dickson e índice de esbeltez) para predecir las tasas de supervivencia en plantación. Algunos otros estudios en el país se han enfocado en la selección de procedencias, donde no se identificaron patrones claros de crecimiento en relación con el origen de estas (Benavides-Meza et al., 2011), mientras que estudios como los de Cruzado-Vargas et al. (2020, 2025) determinaron una tasa de supervivencia de 75 % en vivero e indicaron que los extremos altitudinales de las procedencias de *A. religiosa* mostraron los valores más destacados de variación genética. Los estudios de Cruzado-Vargas et al. (2025) y Manzanilla-Quijada et al. (2024) señalan que las poblaciones de oyamel ubicadas en el límite altitudinal inferior de su distribución podrían sufrir estrés hídrico y mayores tasas de mortalidad en escenarios futuros; por ello, es fundamental contar con plantas de calidad capaces de adaptarse y desarrollarse en nuevas condiciones de establecimiento.

En tal contexto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la calidad morfológica de plantas de *A. religiosa*

Materials and methods

Seedling sourcing

The experiment was conducted at the nursery of the plant tissue culture area (17° 04' N, 96° 46' W; elevation 1 550 m) of the Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), Mexico. A total of 100 eight-month-old *A. religiosa* seedlings were used, with mean height and root collar diameter of 20.1 cm and 2.9 mm, respectively. The seedlings were obtained from the Comisión Estatal Forestal (COESFO) of Oaxaca and transplanted into 20 × 15 cm polyethylene bags containing a substrate composed of forest soil, Peat Moss®, and perlite (1:1:1).

A completely randomized design was used with four treatments based on the doses of Steiner's universal nutrient solution (%): T1 = 40, T2 = 60, T3 = 80 and T4 = 100, plus a control. One seedling was used as the experiment unit, with 20 replicates per treatment. For fertigation, Steiner's universal nutrient solution was applied at a rate of 150 mL·seedling^{-1} every seven days. For four months, seedling height (cm) was measured monthly using a tape measure, root collar diameter (mm) using a digital caliper (Atverce VC 1), and the number of branches was counted.

After four months of evaluation, a destructive sampling was conducted, during which five seedlings were randomly selected per treatment. Each seedling was removed from the polyethylene bag, and excess substrate was washed off with water. The stem, roots, and branches were then separated. The variables measured included seedling height (cm) and root length (cm) measured with a tape measure; root collar diameter (mm) measured with a digital caliper (Atverce VC 1); and branch length (cm) and basal diameter (mm), measured for each branch. To determine leaf area (cm^2), all leaves were detached and placed on a letter-size white sheet. An image was then obtained in JPG format using a scanner (Epson® L220). The images were analyzed using ImageJ® (Schneider et al., 2012) to calculate leaf area and determine specific leaf weight. Leaves identified by seedling and structural organ were stored in paper bags and dried in a drying oven (Memmert® UFP800DW) at 105 °C. Finally, structural dry weight (g) was determined using an analytical balance (SHIMADZU® ATY224).

Seedling quality indicators

According to Escobar-Alonso and Rodríguez-Trejo (2019) and Hernández-Ramos et al. (2021), the following morphological quality and foliar indices were determined:

$$DQI = \frac{TDW}{\frac{H}{RCD} + \frac{SDW}{RDW}}$$

bajo condiciones de fertirriego con cuatro dosis de solución Steiner en condiciones de vivero.

Materiales y métodos

Obtención de plantas

El experimento se realizó en el vivero del área de cultivo de tejidos vegetales (17° 04' N, 96° 46' O a una altitud de 1 550 m) del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), México. Se emplearon 100 plantas de *A. religiosa* de ocho meses con promedio de 20.1 cm de altura y 2.9 mm en diámetro de cuello. Las plantas se obtuvieron en la Comisión Estatal Forestal (COESFO) de Oaxaca y se replantaron en bolsa de polietileno de 20 × 15 cm en un sustrato compuesto de tierra de monte, Peat Moss® y perlita (1:1:1).

Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos de acuerdo con las dosis de la solución universal Steiner (%): T1 = 40, T2 = 60, T3 = 80 y T4 = 100, más un testigo; se utilizó una plántula como unidad experimental con 20 repeticiones por tratamiento. Para el caso del fertirriego, la solución universal Steiner se aplicó en dosis de 150 mL·planta^{-1} cada siete días. Durante cuatro meses se midió mensualmente la altura de la planta (cm) con flexómetro, diámetro de cuello (mm) con vernier digital (Atverce modelo VC 1) y conteo del número de ramas.

A los cuatro meses se hizo la evaluación mediante un muestreo destructivo, para lo cual se seleccionaron cinco plantas al azar por tratamiento. Para ello, la planta se retiró de la bolsa de polietileno y con agua se eliminó el exceso del sustrato, después se separó el tallo de la raíz y ramas. Las variables que se consideraron fueron altura de la planta (cm) y longitud de la raíz (cm) medidas con flexómetro, diámetro de cuello (mm) determinado con vernier digital (Atverce modelo VC 1) y en cada rama se midió su longitud (cm) y el diámetro de base (mm). Para determinar el área foliar (cm^2) se separaron todas las hojas y se colocaron en una hoja blanca tamaño carta, luego se obtuvo una imagen en formato jpg en Scanner (Epson® modelo L220). Las imágenes se analizaron en el programa ImageJ® (Schneider et al., 2012) para calcular área foliar y determinar peso específico foliar. Las hojas identificadas por planta y órgano estructural se almacenaron en bolsas de papel, las cuales se secaron en estufa de secado (Memmert® modelo UFP800DW) a 105 °C; finalmente, se obtuvo el peso seco (g) estructural en una balanza analítica (SHIMADZU® modelo ATY224).

Indicadores de calidad de planta

De acuerdo con Escobar-Alonso y Rodríguez-Trejo (2019) y Hernández-Ramos et al. (2021) se determinaron los índices de calidad morfológica e índices foliares siguientes:

$$SI = \frac{H}{RCD}$$

$$SBRB = \frac{SB}{RB}$$

$$SRR = \frac{S}{R}$$

$$SLW = \frac{LDW}{LA}$$

$$LI = \frac{TDW}{TFW} \times 100$$

where, DQI = Dickson Quality Index, TDW = Total dry wight (g), H = height (cm), RDC = root collar diameter (mm), SDW = shoot dry weight (g), RDW = root dry weight (g), SI = slenderness index (cm·mm^{-1}); SBRB = shoot biomass (SB)/root biomass (RB); SRR = shoot (S)/root ratio (R), SLW = specific leaf weight (g·cm^{-2}), LDW = leaf dry weight (g), LA = leaf area (cm^2), LI = lignification index, TDW = total dry weight (g), TFW = total fresh weight (g).

Data management and analysis

The assumptions of normality and homogeneity of variances were assessed using the Kolmogorov-Smirnov and Bartlett (α = 0.05), respectively. Variables that did not meet these assumptions were transformed using *log(x)* or analyzed using the Kruskal-Wallis test (α = 0.05). Data from destructive sampling at four months were subjected to ANOVA using the general linear model (PROC GLM), followed by Duncan's multiple range test (p = 0.05). Variables measured monthly (height, root collar diameter, and number of branches) were analyzed using repeated-measures ANOVA, followed by Tukey's multiple comparison test (p = 0.05). Similarly, ANOVA using the general linear model (PROC GLM) was performed for relative growth rates in height and root collar diameter, followed by Tukey's multiple comparison test (p = 0.05). Leaf area (LA) per seedling from the destructive sampling was fitted using a nonlinear regression model [$LA = \beta_0\ (RCD^{\beta_1})(H^{\beta_2})$] with PROC MODEL, using root collar diameter (RCD) and seedling height (H) as independent variables. This model was used to estimate LA and specific leaf weight for all seedlings in the experiment.

All analyses were performed using SAS statistical software (Statistical Analysis System Inc., 2024). Finally, seedling quality was assessed based on specific leaf area and the characteristics evaluated by Sáenz-Reyes et al. (2010) in other conifer species.

Results

The treatments evaluated had significant effects ($p \leq$ 0.05) on branches fresh weight, lignification index, and

$$ID = \frac{PST}{\frac{AP}{DC} + \frac{PSPA}{PSR}}$$

$$IE = \frac{AP}{DC}$$

$$RAS = \frac{BA}{BR}$$

$$RAR = \frac{RPA}{RPR}$$

$$PEF = \frac{PSH}{AF}$$

$$IL = \frac{PST}{PVT} \times 100$$

donde, ID = índice de calidad de Dickson, PST = peso seco total (g), AP = altura (cm), DC = diámetro de cuello (mm), PSPA = peso seco parte aérea (g), PSR = peso seco de raíz (g), IE = índice de esbeltez (cm·mm^{-1}); RAS = relación biomasa aérea (BA)/biomasa raíz (BR); RAR = relación parte aérea (RPA)/parte raíz (RPR), PEF = peso específico foliar (g·cm^{-2}), PSH = peso seco de las hojas (g), AF = área foliar (cm^2), IL = índice de lignificación, PST = peso seco total (g), PVT = peso verde total (g).

Manejo y análisis de datos

Los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas de los datos se comprobaron mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y Bartlett (α = 0.05), respectivamente; aquellas variables que no los cumplieron se transformaron a *log(x)* o se analizaron mediante la prueba de Kruskal-Wallis (α = 0.05). Los datos de muestreo destructivo (a los cuatro meses de evaluación) se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) mediante el modelo lineal general (PROC GLM) y pruebas de medias de Duncan (p = 0.05). Las variables medidas de forma mensual (altura, diámetro de cuello y número de ramas) se analizaron a través de ANOVA de medidas repetidas y pruebas de medias de Tukey (p = 0.05); de igual forma, se realizó ANOVA mediante el modelo lineal general (PROC GLM) para las tasas de crecimiento relativo en altura y diámetro de cuello y pruebas de medias de Tukey (p = 0.05). El área foliar (AF) por planta del muestreo destructivo se ajustó mediante modelo de regresión no lineal [$AF = \beta_0\ (DC^{\beta_1})(AP^{\beta_2})$] con PROC MODEL,donde se utilizó el diámetro de cuello (DC) y altura de planta (AP) como variables independientes; con este modelo se estimó el AF y el peso específico foliar de todas las plantas del experimento.

Todos los análisis se hicieron con el paquete estadístico SAS (Statistical Analysis System Inc., 2024); por último, la calidad de planta se calificó con base en el área foliar

specific leaf weight; the remaining variables showed no differences among treatments ($p > 0.05$), indicating that seedling responses to the fertilizer doses were similar. Root length, root fresh weight, and the shoot/root ratio showed the highest experimental error and, consequently, had high coefficients of variation (CV > 46 %). The relative growth rates in height (RGRH) and root collar diameter (RGRD), which showed no differences among treatments, indicate homogeneous growth patterns among seedlings throughout the measurements period (Table 1)

The 40 % Steiner nutrient solution produced the best results for *Abies religiosa* (Table 2). This was reflected in

específica y en las características evaluadas por Sáenz-Reyes et al. (2010) en otras coníferas.

Resultados

Los tratamientos evaluados mostraron efectos significativos ($p \leq 0.05$) en el peso verde de ramas, índice de lignificación y peso específico foliar; el resto de las variables no se diferenciaron entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que indica que la respuesta de las plantas a las dosis de fertilizante fue similar. La longitud de raíz, peso verde raíz y relación parte aérea/parte raíz mostraron el mayor error experimental; por consiguiente, tuvieron coeficientes altos de variación

Table 1. Analysis of variance and Kruskal-Wallis test for morphological variables evaluated in *Abies religiosa* seedlings under fertigation with Steiner solution.

Cuadro 1. Análisis de varianza y prueba de Kruskal-Wallis de las variables morfológicas evaluadas en plantas de *Abies religiosa* bajo condiciones de fertirriego con solución Steiner.

Variable (df = 20)	Mean squares / Cuadrados medios	Error	CV (%)	RMSE / RCME
ANOVA				
Height / Altura	17.46 ns	10.98	12.5	3.3
Root collar diameter / Diámetro de cuello	0.73 ns	0.38	15.3	0.6
Stem fresh weight / Peso verde tallo	2.20 ns	1.46	26.1	1.2
Branch fresh weight / Peso verde ramas	12.16*	4.44	41.5	2.1
Total fresh weight / Peso verde total	26.65 ns	12.86	28.5	3.5
Stem dry weight / Peso seco tallo	0.20 ns	0.18	24.8	0.4
Root dry weight / Peso seco raíz	0.037 ns	0.11	30.6	0.3
Branch dry weight / Peso seco ramas	1.00 ns	0.48	43.1	0.6
Total dry weight / Peso seco total	1.67 ns	1.45	26.9	1.2
Slenderness index / Índice de esbeltez	0.62 ns	0.85	13.8	0.9
Dickson Quality Index / Índice de Dickson	0.13 ns	0.12	15.3	0.3
Height/root dry weight ratio / Relación altura/peso seco del sistema radical	0.018 ns	0.07	8.6 (8.3)†	0.2
Shoot biomass/root biomass ratio / Relación biomasa aérea/biomasa raíz	0.010 ns	0.01	12.5 (21.0)†	0.1
Lignification index / Índice de lignificación	51.29*	19.52	12.2	4.4
Specific leaf weight / Peso específico foliar	0.30*	0.10	28.1	0.3
Leaf area / Área foliar	1.21 ns	1.06	32.4	1.0
Relative growth rate in height / Tasa de crecimiento relativo en altura	1.05 ns	0.78	83.6	0.8
Relative growth rate in diameter / Tasa de crecimiento relativo en diámetro	0.02 ns	0.02	45.0	0.1
Kruskal-Wallis test / Prueba de Kruskal-Wallis				
Root length / Largo de la raíz	205.14 ns	235.80	-462.6 (82.1)†	15.3
Root fresh weight / Peso verde raíz	23.00 ns	60.40	59.7 (52.2)†	7.7
Shoot/root ratio / Relación parte aérea/raíz	94.70 ns	46.06	52.2 (25.4)†	6.7

df = degrees of freedom, CV = coefficient of variation, RMSE = root mean square error. †Natural logarithm transformation: transformed and original values are shown in parentheses. *Significant ($p \leq 0.05$); ns = not significant ($p > 0.05$).

gl = grados de libertad, CV = coeficiente de variación, RCME = raíz del cuadrado medio del error. †Transformación a logaritmo natural: valor transformado y real entre paréntesis. *significativo ($p \leq 0.05$); ns = no significativo ($p > 0.05$).

Table 2. Effect of Steiner solution treatment doses on morphological and growth indicators of *Abies religiosa* seedlings.
Cuadro 2. Efecto de las dosis de tratamiento de la solución Steiner en indicadores morfológicos y de crecimiento de plantas de *Abies religiosa*.

Indicators / Indicadores	Control / Testigo	T1 (100 % dose) / T1 (dosis 100 %)	T2 (80 % dose) / T2 (dosis 80 %)	T3 (60 % dose) / T3 (dosis 60 %)	T4 (40 % dose) / T4 (dosis 40 %)
Height (cm) / Altura (cm)	26.80 ± 1.55 a	27.70 ± 1.17 a	24.28 ± 1.37 a	24.72 ± 1.94 a	28.58 ± 1.22 a
Root collar diameter (mm) / Diámetro de cuello (mm)	3.91 ± 0.27 a	4.39 ± 0.24 a	3.81 ± 0.16 a	3.52 ± 0.37 a	4.40 ± 0.28 a
Root length (cm) / Largo de la raíz (cm)	31.88 ± 3.71 a	28.90 ± 2.18 a	63.56 ± 3.91 a	31.40 ± 1.88 a	32.30 ± 3.94 a
Stem fresh weight (g) / Peso verde del tallo (g)	4.53 ± 0.23 a	4.70 ± 0.39 a	4.04 ± 0.61 a	4.18 ± 0.54 a	5.73 ± 0.76 a
Root fresh weight (g) / Peso verde de raíz (g)	3.04 ± 3.02 a	2.37 ± 3.08 a	2.89 ± 3.12 a	2.21 ± 3.16 a	3.80 ± 4.68 a
Branch fresh weight (g) / Peso verde de ramas (g)	3.68 ± 0.37 b	4.39 ± 0.94 ba	3.76 ± 1.33 b	6.62 ± 0.64 ba	6.87 ± 1.10 a
Total fresh weight (g) / Peso verde total (g)	11.26 ± 1.20 b	11.47 ± 1.32 ba	10.71 ± 2.01 b	13.07 ± 1.41 ba	16.41 ± 1.89 a
Stem dry weight (g) / Peso seco de tallo (g)	1.83 ± 0.26 a	1.78 ± 0.13 a	1.48 ± 0.15 a	1.65 ± 0.21 a	2.02 ± 0.18 a
Root dry weight (g) / Peso seco de la raíz (g)	1.13 ± 0.18 a	1.18 ± 0.19 a	0.95 ± 0.14 a	1.07 ± 0.08 a	1.10 ± 0.10 a
Branch dry weight (g) / Peso seco de ramas (g)	1.25 ± 0.14 a	1.39 ± 0.25 a	1.24 ± 0.37 a	2.21 ± 0.14 a	1.97 ± 0.48 a
Total dry weight (g) / Peso seco total (g)	4.21 ± 0.52 a	4.37 ± 0.44 a	3.67 ± 0.63 a	4.94 ± 0.40 a	5.10 ± 0.64 a
Slenderness index ($cm \cdot mm^{-1}$) / Índice de esbeltez ($cm \cdot mm^{-1}$)	6.90 ± 0.36 a	6.37 ± 0.42 a	6.38 ± 0.36 a	7.17 ± 0.60 a	6.53 ± 0.21 a
Dickson Quality Index / Índice de Dickson	2.27 ± 0.10 a	2.29 ± 0.12 a	2.28 ± 0.25 a	2.23 ± 0.13 a	2.62 ± 0.14 a
SRR / RAR	0.85 ± 0.05 ba	0.97 ± 0.06 a	0.62 ± 0.13 b	0.79 ± 0.04 ba	0.94 ± 0.13 a
HRDWR / RAPSR	25.76 ± 3.70 a	25.71 ± 3.94 a	28.85 ± 6.07 a	22.98 ± 0.80 a	26.50 ± 1.85 a
SBRB / RAS	1.65 ± 0.10 a	1.58 ± 0.13 a	1.69 ± 0.28 a	1.52 ± 0.08 a	1.83 ± 0.07 a
Lignification index / Índice de lignificación	37.26 ± 1.19 ba	38.73 ± 2.24 a	34.77 ± 2.11 ba	38.65 ± 2.13 a	31.15 ± 2.01 b
Leaf area (cm^2) / Área foliar (cm^2)	3.81 ± 0.13 a	3.51 ± 0.69 a	2.67 ± 0.59 a	3.17 ± 0.34 a	2.37 ± 0.31 a
Specific leaf weight ($g \cdot cm^2$) / Peso específico foliar ($g \cdot cm^2$)	0.81 ± 0.11 b	1.00 ± 0.15 b	1.09 ± 0.15 ba	1.24 ± 0.09 ba	1.47 ± 0.17 a
RGRH / TCRA	1.34 ± 0.19 a	1.14 ± 0.24 a	1.15 ± 0.24 a	1.14 ± 0.14 a	0.83 ± 0.122 a
RGRRCD / TCRD	0.32 ± 0.02 a	0.33 ± 0.04 a	0.32 ± 0.03 a	0.27 ± 0.02 a	0.36 ± 0.03 a

SRR = shoot/root ratio, HRDWR = height/root dry weight ratio, SBRB = shoot dry biomass/root dry biomass (g), RGRH = relative growth rate in height; RGRRCD = Relative growth rate in root collar diameter. Values are means ± standard error (n = 5). Different letters in rows indicate statistically significant differences according to Duncan's multiple range test ($p = 0.05$).

RAR = relación parte aérea/parte raíz, RAPSR = relación altura/peso seco raíz, RAS = biomasa seca aérea/biomasa raíz (g), TCRA = tasa de crecimiento relativo en altura; TCRD = tasa de crecimiento relativo en diámetro. Valores promedios ± error estándar (n = 5). Letras distintas en filas son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Duncan ($p = 0.05$).

the highest specific leaf weight, indicating that each square centimeter of leaf area weighed 1.47 g, whereas the control had a value of 0.81 g·cm^{-2}, which was 81.4 % lower. The same dose (40 %) also resulted in the highest branch fresh weight (6.87 g), which was 86.6 % higher than that of the control; it also resulted in a lower lignification index (31.2).

During the sequential measurements, seedling height differed significantly ($p \leq 0.05$) among treatments at the beginning and end of the experiment (December and March), root collar diameter differed during the intermediate months (January-February), and the number of branches differed in March (Table 3).

In the first month of measurement (December), seedling height was greater under the 40 % dose (T4). This variable showed no differences among treatments during the following two months; however, in the fourth month (March), all fertigation doses resulted in greater height than the control. Similarly, the average number of branches was 13.8 % higher in fertigated seedlings. In February, the 60 % dose resulted in the greatest root collar diameter, which was 24.7 % higher than that of the control (Table 4).

Root collar diameter and seedling height from the destructive sampling explained 74 % (R^2_{adj} = 0.74) of

(CV > 46 %). Las tasas de crecimiento relativo en altura (TCRA) y diámetro (TCRD), no diferenciadas entre tratamientos, indican homogeneidad en el comportamiento de cada planta durante el tiempo de medición (Cuadro 1).

La solución nutritiva Steiner al 40 % generó los mejores resultados para las plantas de *Abies religiosa* (Cuadro 2); esto se refleja en el mejor valor del peso específico foliar que indica que cada centímetro de área foliar pesa 1.47 g, mientras que el testigo generó 0.81 g·cm^{-2}, valor 81.4 % menor. La misma dosis (40 %) también mostró el mayor peso fresco de ramas (6.87 g), el cual superó en 86.6 % al testigo; asimismo, reflejó un índice de lignificación menor (31.2).

Durante los muestreos secuenciales, la altura de la planta varió significativamente ($p \leq 0.05$) entre los tratamientos al inicio y al final del experimento (diciembre y marzo), el diámetro del cuello fue diferente en los meses intermedios (enero-febrero) y el número de ramas en el mes de marzo (Cuadro 3).

En el primer mes de medición (diciembre), la altura de planta fue superior en la dosis de 40 % (T4); esta variable no se diferenció entre los tratamientos durante los dos meses siguientes, pero en el mes cuatro (marzo), el efecto de todas las dosis de fertirriego superó al testigo.

Table 3. Summary of repeated-measures analysis of variance over time for *Abies religiosa* seedlings treated with fertigation using Steiner solution.

Cuadro 3. Resumen de análisis de varianza con medidas repetidas en el tiempo en plantas de *Abies religiosa* tratadas con fertirriego mediante solución Steiner.

Variable (df = 95) / Variable (gl = 95)	Mean squares / Cuadrados medios	Error	CV (%)	RMSE / RCME
Height / Altura				
Month 1 (December) / Mes 1 (diciembre)	24.84*	9.29	13.7	3.04
Month 2 (January) / Mes 2 (enero)	0.73 ns	0.38	15.3	0.61
Month 3 (February) / Mes 3 (febrero)	14.87 ns	12.19	14.3	3.49
Month 4 (March) / Mes 4 (marzo)	11.91*	14.55	15.0	3.81
Root collar diameter / Diámetro de cuello				
Month 1 (December) / Mes 1 (diciembre)	0.09 ns	0.26	15.8	0.51
Month 2 (January) / Mes 2 (enero)	0.72*	0.27	14.7	0.51
Month 3 (February) / Mes 3 (febrero)	2.30*	0.52	17.9	0.72
Month 4 (March) / Mes 4 (marzo)	0.49 ns	0.34	14.0	0.59
Number of branches / Número de ramas				
Month 1 (December) / Mes 1 (diciembre)	6.86 ns	5.22	34.0	2.28
Month 2 (January) / Mes 2 (enero)	6.63 ns	5.27	32.5	2.29
Month 3 (February) / Mes 3 (febrero)	5.71 ns	5.78	32.2	2.40
Month 4 (March) / Mes 4 (marzo)	6.25*	6.77	32.3	2.60

df = degrees of freedom, CV = coefficient of variation, RMSE = root mean square error, *Significant ($p \leq 0.05$), ns = not significant ($p > 0.05$).

gl = grados de libertad, CV = coeficiente de variación, RCME = raíz del cuadrado medio del error, *significativo ($p \leq 0.05$), ns = no significativo ($p > 0.05$).

Table 4. Comparison of morphological variables of *Abies religiosa* over time under fertigation with Steiner solution.
Cuadro 4. Comparación de variables morfológicas de *Abies religiosa* a través del tiempo tratadas con fertirriego mediante solución Steiner.

Month /Mes	Control/Testigo	T1 (100 % dose)/ T1 (dosis 100 %)	T2 (80 % dose)/ T2 (dosis 80 %)	T3 (60 % dose)/ T3 (dosis 60 %)	T4 (40 % dose)/ T4 (dosis 40 %)
Height (cm)/Altura de la planta (cm)					
Month 1 (December)/Mes 1 (diciembre)	21.19 ± 0.64 b	21.52 ± 0.68 ab	22.36 ± 0.71ab	21.99± 0.73ab	24.05 ± 0.61 a
Month 2 (January)/Mes 2 (enero)	22.00 ± 0.63 a	22.59 ± 0.73 a	22.60 ± 0.84 a	23.32 ± 0.90 a	24.74 ± 0.59 a
Month 3 (February)/Mes 3 (febrero)	23.66 ± 0.63 a	23.84 ± 0.72 a	24.54 ± 0.98 a	24.10 ± 0.91 a	25.81 ± 0.57 a
Month 4 (March)/Mes 4 (marzo)	23.90 ± 0.61 b	24.96 ± 0.87 a	25.84 ± 1.14 a	25.50 ± 0.90 a	25.84 ± 0.60 a
Root collar diameter (mm)/Diámetro de cuello (mm)					
Month 1 (December)/Mes 1 (diciembre)	3.21 ± 0.12 a	3.20 ± 0.10 a	3.21 ± 0.11 a	3.15 ± 0.09 a	3.33 ± 0.12 a
Month 2 (January)/Mes 2 (enero)	3.49 ± 0.12 ba	3.57 ± 0.09 ba	3.21 ± 0.11 b	3.55 ± 0.09 ba	3.74 ± 0.14 a
Month 3 (February)/Mes 3 (febrero)	3.65 ± 0.12 b	3.93 ± 0.10 ba	3.87 ± 0.11 b	4.55 ± 0.25 a	4.13 ± 0.15 ba
Month 4 (March)/Mes 4 (marzo)	4.17 ± 0.14 a	4.19 ± 0.11 a	4.19 ± 0.11 a	3.97 ± 0.12 a	4.42 ± 0.15 a
Number of branches/Número de ramas					
Month 1 (December)/Mes 1 (diciembre)	5.90 ± 0.49 a	6.50 ± 0.52 a	7.40 ± 0.52 a	7.15 ± 0.50 a	6.65 ± 0.50 a
Month 2 (January)/Mes 2 (enero)	6.25 ± 42 a	6.80 ± 0.50 a	7.50 ± 0.53 a	7.70 ± 0.56 a	7.05 ± 0.53 a
Month 3 (February)/Mes 3 (febrero)	6.65 ± 0.50 a	7.25 ± 0.53 a	8.05 ± 0.63 a	7.65 ± 0.50 a	7.70 ± 0.49 a
Month 4 (March)/Mes 4 (marzo)	7.25 ± 0.45 b	7.80 ± 0.57 a	8.70 ± 0.72 a	8.10 ± 0.62 a	8.40 ± 0.49 a

Values are means (n = 4) ± standard error. Means with the same letter are not significantly different between doses, according to Tukey's test ($p = 0.05$).
Medias con letras iguales indican diferencias estadísticas inexistentes entre dosis, de acuerdo con la prueba de Tukey ($p = 0.05$).

the variation in leaf area of sacred fir seedlings. The exponential model and its regression parameters were highly significant ($p \leq 0.001$), with a CV of 6.2 % and a root mean square error (RMSE) of 17 % (Figure 1). This model was used to assess leaf area and specific leaf weight for the entire experimental seedling lot. Thus, specific leaf weight and lignification index were rated as medium to high under the 40 % and 60 % fertigation doses. These treatments also received the same ratings for the other variables evaluated in *A. religiosa,* except for leaf area (Table 5).

Discussion

Monthly applications of Steiner nutrient solution at different doses improved the morphological quality of *A. religiosa* seedlings. At the 40 % dose, branch fresh weight and specific leaf weight increased by 86.7 % and 81.5 %, respectively, compared with the control; in contrast, the lignification index of seedlings under this dose decreased by 23 % compared to the control (Table 2). The remaining morphological indicators showed no differences among treatments; therefore, extending the evaluation period to eight months is recommended to detect differential responses, as reported by Navarro-Sandoval et al. (2013). In that study, Peters Professional® fertilizer was applied through sprinkler irrigation twice a week, and differences in seedling height and root collar diameter among treatments were observed only after eight months. Moreno-Chávez et al. (2002)

De igual manera, en promedio, el número de ramas fue 13.8 % mayor en las plantas fertirrigadas. Por otro lado, en el mes de febrero se obtuvo mejor respuesta en el diámetro del cuello con dosis al 60 %, la cual superó al testigo en 24.7 % (Cuadro 4).

El diámetro del cuello y la altura de las plantas utilizadas en el muestreo destructivo lograron explicar 74 % ($R^2_{adj} = 0.74$) del área foliar de plantas de oyamel; el modelo de tipo exponencial, así como los parámetros de regresión, mostraron alta significancia estadística ($p \leq 0.001$), CV = 6.2 % y raíz del cuadrado medio del error (RCME) de 17 % (Figura 1). Este modelo se utilizó para calificar la calidad en área foliar y peso específico foliar de todo el lote experimental de plantas. De esta manera, el peso específico foliar e índice de lignificación se catalogan de medios a altos en las dosis de fertirriego de 40 % y 60 %; además, estos tratamientos tuvieron las mismas calificaciones en el resto de las variables evaluadas en *A. religiosa*, excepto en área foliar (Cuadro 5).

Discusión

La aplicación de riegos mensuales con diferentes dosis de solución nutritiva Steiner mejoró la calidad morfológica de plantas de *A. religiosa*. En el caso de la dosis del 40 %, el peso verde de ramas y el peso específico foliar incrementaron, respectivamente, 86.7 % y 81.5 % con relación al testigo; en contraparte, el índice de lignificación de las plantas de esta dosis se redujo 23 % respecto al testigo

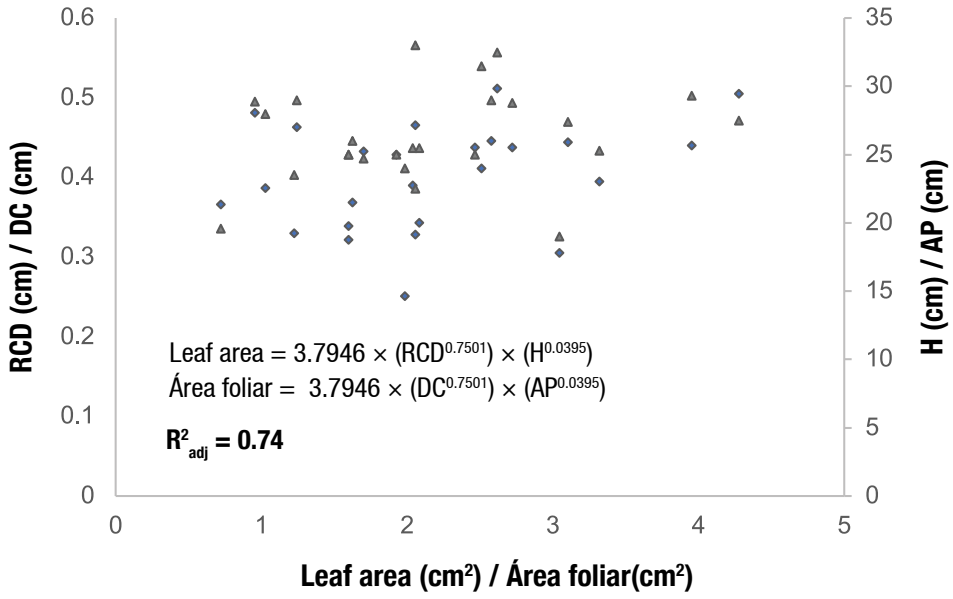


Figure 1. Estimation of leaf area in relation to root collar diameter (RCD) and seedling height (H) in *Abies religiosa* under fertigation with Steiner solution.

Figura 1. Estimación de área foliar en función al diámetro de cuello (DC) y la altura de planta (AP) de *Abies religiosa* bajo condiciones de fertirriego con solución Steiner.

Table 5. Seedling quality classification of *Abies religiosa* based on morphological attributes after four months of fertigation with Steiner solution. Classification based on Sáenz-Reyes et al. (2010).

Cuadro 5. Clasificación de calidad de planta de *Abies religiosa* con base en sus atributos morfológicos después de cuatro meses de fertirriego con solución Steiner. Clasificación con base en el estudio de Sáenz-Reyes et al. (2010).

Variables	Control / Testigo	T1 (100 % dose) / T1 (dosis 100 %)	T2 (80 % dose) / T2 (dosis 80 %)	T3 (60 % dose) / T3 (dosis 60 %)	T4 (40 % dose) / T4 (dosis 40 %)
Height / Altura	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta
Diameter / Diámetro	Intermediate / Media	High / Alta	Intermediate	Intermediate / Media	High / Alta
Shoot/root diameter / Relación parte aérea/raíz	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta
Shoot biomass/root biomass / Biomasa aérea/biomasa raíz	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta
Dickson Quality Index / Índice de Dickson	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta	High / Alta
Slenderness index / Índice de esbeltez	Intermediate / Media	Intermediate / Media	Intermediate / Media	Intermediate / Media	Intermediate / Media
Lignification index / Índice de lignificación	Intermediate / Media	Intermediate / Media	High / Alta	Intermediate / Media	High / Alta
Leaf area / Área foliar	High / Alta	High / Alta	Low / Baja	High / Alta	Low / Baja
Specific leaf weight / Peso específico foliar	Low / Baja	Intermediate / Media	Intermediate / Media	High / Alta	High / Alta

argued that *A. religiosa* should be fertilized for seven months under nursery conditions to observe its effects; in the present study, the evaluation period was only four months.

In this study, the 40 % and 60 % Steiner solution fertigation doses were the most effective in promoting root collar diameter, height and branch number growth in *A. religiosa* seedlings; all doses differed from the control during some months of measurements (Table 4). The variation in the height of *A. religiosa* seedlings at the beginning and end of the experiment was probably caused by temperature variations, as the seedlings originated from a cold climate at an elevation close to 3 000 m, whereas the experiment was conducted at an elevation of 1 550 m under shade netting. These changes associated with the transfer between elevations may result in variations in the growth of morphological traits (Cruzado-Vargas et al., 2025; Manzanilla-Quijada et al., 2024).

Steiner nutrient solution had not previously been used in sacred fir, but it has been used in *Pinus greggii.* Román-Jiménez et al. (2004) showed that 10 mL doses with different N-P-K concentrations applied for 8.5 months significantly affected ($p \leq 0.05$) seedling growth. Shoot dry biomass/root dry biomass ratio and Dickson Quality Index were higher, indicating that the treatments promoted shoot growth more than root growth.

In the present study, the relative growth rates in height and root collar diameter were similar among treatments (Table 2); that is, the Steiner solution doses did not result in differential growth in height or root collar diameter compared with the control. Therefore, future studies should extend the measurement period to seven or eight months. Regarding the evaluation period, Nzokou and Cregg (2010) applied MESA™ Lebanon Turf fertilizer to *Abies fraseri* (Pursh) Poir. for up to 24 months to detect a significant effect on seedling height. Other studies have used controlled-release fertilizer (CRF) doses and reported significant differences after eight months in root collar diameter, shoot dry biomass/root dry biomass ratio, total dry weight, and Dickson Quality Index in *P. greggii* (Vicente-Arbona et al*.,* 2019), as well as in the lignification index in *P. patula* Schl. et Cham. and *P. oaxacana* Mirov. (Paz-Paz et al., 2023).

The advantage of using Steiner solution in forest species such as sacred fir lies in its complete macronutrient composition at different concentrations (40, 60, 80, 100 % used in this study), which can affect seedling morphological and physiological quality in the medium and long term. These effects began to become evident after the short four-month evaluation period in specific leaf weight, as seedlings fertigated with the 40 % dose had a specific leaf weight of (Cuadro 2). El resto de los indicadores morfológicos fue el mismo entre tratamientos, por lo que se sugiere que el tiempo de evaluación se amplíe hasta ocho meses para encontrar respuestas diferenciales, tal como lo señalan Navarro-Sandoval et al. (2013). En dicho estudio, se evaluaron dosis de fertilizante Peters Professional® en riego con atomizador dos veces por semana y hasta los ocho meses notaron diferencias de altura de la planta y diámetro de cuello entre tratamientos. Moreno-Chávez et al. (2002) argumentan que, en *A. religiosa,* la fertilización se debe de realizar siete meses en condiciones de vivero para poder apreciar el efecto; en el presente estudio solo se evaluaron cuatro meses.

En el presente estudio, las dosis de fertirriego del 40 % y 60 % de solución Steiner fueron las más efectivas para promover el crecimiento del diámetro de cuello, altura y número de ramas en plantas de *A. religiosa*; todas las dosis se diferenciaron del testigo, en algunos meses de medición (Cuadro 4). La variación de la altura de la planta de *A. religiosa,* al inicio y final del experimento, probablemente se originó por las variaciones de temperatura, ya que las plantas procedían de clima frío (altitud cercana a 3 000 m), mientras que el experimento se desarrolló en un sitio a 1 550 m de altitud, protegido con malla sombra; estos cambios en el movimiento altitudinal generan variaciones en el crecimiento de variables morfológicas (Cruzado-Vargas et al., 2025; Manzanilla-Quijada et al., 2024).

La solución nutritiva Steiner no había sido utilizada en oyamel, pero sí en *Pinus greggii*, donde Román-Jiménez et al. (2004) mostraron que las dosis de 10 mL con distintas concentraciones de N-P-K aplicadas por 8.5 meses afectaron de manera significativa ($p \leq 0.05$) el crecimiento de las plantas; la biomasa seca aérea/biomasa raíz e índice de Dickson fueron superiores, lo que indica que promovieron más el crecimiento aéreo que el de las raíces.

En el presente estudio, las tasas de crecimiento relativo en altura y diámetro de cuello fueron iguales entre tratamientos (Cuadro 2); es decir, las dosis de solución Steiner no generaron crecimiento diferenciado en altura y diámetro con relación al testigo. Por ello, se recomienda que, en investigaciones futuras, el tiempo de medición se amplíe a siete u ocho meses. Respecto al tiempo de evaluación, Nzokou y Cregg (2010) utilizaron fertilizante MESA™ Lebanon Turf en *Abies fraseri* (Pursh) Poir. hasta por 24 meses para encontrar efecto significativo en la altura de planta. En otros estudios se han utilizado dosis de fertilizante de liberación lenta (FLL) y se han reportado diferencias significativas hasta los ocho meses en el diámetro de cuello, biomasa seca aérea/biomasa raíz, peso seco total e índice de Dickson en *P. greggii* (Vicente-Arbona et al*.,* 2019) y en el índice de lignificación en *P. patula* Schl. et Cham. y en *P. oaxacana* Mirov. (Paz-Paz et al., 2023).

1.47 g·cm^2, which was 81.5 % higher than that of the control (0.81 g·cm^2). This specific leaf weight indicates greater leaf density per unit area; that is, each square centimeter of leaf area in seedlings receiving the 40 % dose weighed 1.47 g. This characteristic may provide the seedlings with greater photosynthetic capacity, potentially resulting in improved morphological and physiological traits during the nursery stage and even during the initial stages after planting in the field (Gallardo-Salazar et al., 2019; Grossnickle & MacDonald, 2018; Hernández-Ramos et al., 2021; Kuan-Hung et al., 2019). Fertilizing forest seedlings with Steiner solution in the nursery may also provide advantages in terms of low cost and prolonged effects that may persist after planting in the field.

Fertilization in forest nurseries can also produce contrasting results. For example, in *P. greggii,* the control produced greater root biomass than treatments using controlled-release fertilizer (CFR) and water-soluble fertilizers applied for 4.5 months (Bautista-Ojeda et al., 2018). Likewise, no significant differences in seedling height were found at nine months of age in *Pinus cooperi* Blanco treated with Multicote® fertilizer (González-Orozco et al., 2018), nor in *P. douglasiana* Martínez and *P. devoniana* Lindl. (Bernaola-Paucar et al., 2016).

Regarding seedling quality, evidence indicates that, in nine-month-old *Pinus* species, fertilization with SFR resulted in height growth classified as high quality and root collar diameter classified as medium quality, which resulted in low seedling slenderness (Sáenz-Reyes et al*.,* 2014), as well as high-quality Dickson Quality Index values for *P. patula*, *P. oaxacana* and *P. greggii* (Heras-Marcial et al., 2023; Paz-Paz et al*.,* 2023; Vicente-Arbona et al*.,* 2019). Similarly, the application of SFR to *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* (Rodríguez-Ortiz et al*.,* 2020) and *Pinus durangensis* Mart. (González-Alemán et al., 2025) produced high-quality seedlings.

Conclusions

The evaluation of the morphological quality of *Abies religiosa* seedlings under nursery conditions showed positive effects of 40 % and 60 % Steiner solution on specific leaf weight and lignification index. In addition, height and root collar diameter growth differed intermittently throughout the evaluation period. Leaf area can be reliably estimated in four-month-old sacred fir seedings using root collar diameter and seedling height as predictor variables, which is essential for estimating photosynthetic capacity during the nursery growth phase and useful for improving the morphological and physiological quality of seedlings. The high morphological quality observed in sacred fir seedlings under fertigation with certain doses of Steiner solution suggests that they may perform better when planting in the field.

La ventaja del uso de solución Steiner en especies forestales, como el oyamel, redunda en la composición completa de macronutrientes a diferentes concentraciones (40, 60, 80, 100 % utilizadas en este estudio), que pueden impactar en la calidad morfológica y fisiológica de la planta en el mediano y largo plazo. Esto se comienza a reflejar en el corto plazo de cuatro meses en el peso específico foliar, ya que aquellas plantas fertirrigadas con dosis de del 40 % generaron 1.47 g·cm^2, el cual fue 81.5 % mayor que el testigo (0.81 g·cm^2). Este peso específico foliar implica una mayor densidad de las hojas por unidad de área; es decir, cada centímetro cuadrado de plantas con dosis del 40 % tiene un peso de 1.47 g. Tal característica confiere mayor capacidad fotosintética a la planta, lo cual puede detonar en mejores características morfológicas y fisiológicas durante la etapa de vivero e incluso en los estadios iniciales en el sitio de plantación (Gallardo-Salazar et al., 2019; Grossnickle & MacDonald, 2018; Hernández-Ramos et al., 2021; Kuan-Hung et al., 2019). La fertilización de planta forestal con solución Steiner en vivero también podría aportar ventajas referentes a los costos bajos y a su acción prolongada que puede perdurar hasta el sitio de plantación.

La fertilización que se realiza en los viveros forestales también puede tener resultados contradictorios, como el caso de *P. greggii* donde el testigo tuvo mayor producción de biomasa en raíz, que cuando se utilizó fertilizante de liberación controlada (FLC) y fertilizantes solubles en agua por 4.5 meses (Bautista-Ojeda et al., 2018). Asimismo, en *Pinus cooperi* Blanco no se encontraron diferencias significativas en altura de planta a los nueve meses de edad con el fertilizante Multicote® (González-Orozco et al., 2018) ni en *P. douglasiana* Martínez y *P. devoniana* Lindl. (Bernaola-Paucar et al., 2016).

Con respecto a la calidad de planta, existe evidencia que, en especies de *Pinus* de nueve meses de edad, la fertilización con FLL generó crecimiento en altura catalogado como planta de calidad alta y diámetro de cuello de calidad media, lo que repercute en la baja robustez de la planta (Sáenz-Reyes et al*.,* 2014), así como índices de Dickson de calidad alta para *P. patula*, *P. oaxacana* y *P. greggii* (Heras-Marcial et al., 2023; Paz-Paz et al*.,* 2023; Vicente-Arbona et al*.,* 2019). De igual manera, la aplicación de FLC en *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* (Rodríguez-Ortiz et al*.,* 2020) y *Pinus durangensis* Mart. (González-Alemán et al., 2025) generó plantas de calidad alta.

Conclusiones

En la evaluación de la calidad morfológica de plantas de *Abies religiosa* en condiciones de vivero se observaron efectos positivos de la solución Steiner del 40 % y 60 % sobre los indicadores de peso específico foliar e índice de lignificación de las plantas; además, el crecimiento

Acknowledgments

We thank M. C. Magdalena María Coello Castillo, head of the Comisión Estatal Forestal (COESFO) for donating the seedlings used in this study.

Conflict of Interest Declaration

The authors declare that they have no economic conflicts of interest.

Declaration of Artificial Intelligence (AI) Use

The authors declare that no generative AI or AI-assisted technology was used in the preparation of this manuscript.

End of English version

References / Referencias

Bautista-Ojeda, G. I., Prieto-Ruíz, J. Á., Hernández Díaz, J. C., Basave-Villalobos, E., Goche-Télles, 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

Benavides-Meza, H. M., Gazca-Guzmán, M. O., López-López, S. F., Camacho-Morfín, F., Fernández-Grandizo, D. Y., & Nepamuceno-Martínez, F. (2011). Variabilidad en el crecimiento de plántulas de ocho procedencias de *Abies religiosa* (HBK) Schlecht. et Cham., en condiciones de vivero. *Madera y Bosques*, *17*(3), 83-102. https://doi.org/10.21829/myb.2011.1731144

Bernaola-Paucar, R. M., Zamora-Natera, J. F., Vargas-Radillo, J. de J., Cetina-Alcalá, V. M., Rodríguez-Macías, R., & Salcedo-Pérez, E. (2016). Calidad de planta en etapa de vivero de dos especies de pino en sistema doble-trasplante. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *7*(33), 74-93. https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i33.91

Burney, O., Aldrete, A., Alvarez-Reyes, R., Prieto-Ruíz, J. A., Sánchez-Velazquez, J. R., & Mexal, J. G. (2015). México addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, *113*(4), 404-413. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.558

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2014). *Abies religiosa (Kunth Schltdl. et Cham.). Reforestación-Fichas técnicas.* http://www.conafor.gob.mx:8080/ documentos/docs/13/873 *Abies20religiosa*.pdf

Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2022). *Programa apoyos para el desarrollo forestal sustentable 2022.* https://www.gob.mx/conafor/documentos/reglas-de-operacion-2022

Cruzado-Vargas, A. L., Lindig-Cisneros, R., Blanco-García, A., López-Toledo, L., Gómez-Romero, M., Barrera Montppellier, E., & Sáenz-Romero, C. (2025). Prediction of the impact climate change on *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. et Cham. and the feasibility of assisted migration. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *31*, e24019. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2024.09.019

en altura y diámetro se diferenciaron de manera intermitente durante el periodo de evaluación. Es posible estimar de manera confiable el área foliar en plantas de oyamel de cuatro meses, utilizando el diámetro de cuello y altura de planta como variables predictoras, lo cual es fundamental para estimar la capacidad fotosintética durante la fase de crecimiento en vivero y útil para mejorar la calidad morfológica y fisiológica de las plantas. La calidad morfológica alta encontrada en oyamel, bajo fertirrigación con ciertas dosis de solución Steiner, sugiere que las plantas mostrarán mejor desempeño cuando sean llevadas al sitio de plantación.

Agradecimientos

A la M. C. Magdalena María Coello Castillo, titular de la Comisión Estatal Forestal (COESFO) por las plantas donadas para este estudio.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

Declaración del uso de inteligencia artificial (IA)

Los autores declaramos no haber utilizado IA generativa o tecnologías asistidas por IA para el desarrollo del presente manuscrito.

Fin de la versión en español

Cruzado-Vargas, A. L., Zamudio-Sánchez, F. J., Rodríguez-Yam, G. A., Carbajal-Navarro, A. L., Blanco-García, J. A., & Sáenz-Romero, C. (2020). Crecimiento de plántulas de regeneración natural de *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham. en vivero y variación genética entre procedencias. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *26*(1), 85-96. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.013

Cruz-Crespo, E., Can-Chulim, Á., Bugarín-Montoya, R., Pineda-Pineda, J., Flores-Canales, R., Juárez-López, P., & Alejo-Santiago, G. (2014). Concentración nutrimental foliar y crecimiento de chile serrano en función de la solución nutritiva y el sustrato. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *37*(3), 289-295. https://doi.org/10.35196/rfm.2014.3.289

Ellison, D. S., Schutzki, R., Nzokou, P., & Cregg, B. (2016). Root growth potential, water relations and carbohydrate status of ash alternative species following pre-plant storage. *Urban Forestry & Urban Greening*, *18*, 59-64. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.05.001

Escobar-Alonso, S., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2019). Estado del arte en la investigación sobre calidad de planta del género *Pinus* en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *10*(55), 4-38. https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i55.558

Farjon, A. (2013). *Abies religiosa. The IUCN Red List of Threatened Species.* https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T39592A2929657.en

Flores-García, A., Romero-Sánchez, M. E., Pérez-Miranda, R., Pineda-Ojeda, T., & Moreno-Sánchez, F. (2021). Potencial de restauración de bosques de coníferas en zonas de movimiento de germoplasma en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *12*(63), 4-27. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.813

Gallardo-Salazar, J. L., Rodríguez-Trejo, D. A., & Castro-Zavala, S. (2019). Calidad de planta y supervivencia de una plantación de oyamel [*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et* Cham.] de dos procedencias en México central. *Agrociencia*, *53*(4), 631-643. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1833/1830

Gandica-Omaña, H., & Peña, H. (2015). Acumulación de materia seca y balance de nutrientes en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cultivado en ambiente protegido. *Bioagro*, *27*(2), 111-120. https://doi.org/10.22319/rmcp.v15i2.6554

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

González-Orozco, M. M., Prieto-Ruíz, J. Á., 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). Seedling quality: History, application, and plant attributes. *Forests*, *9*(5), 283. https://doi.org/10.3390/f9050283

Heras-Marcial, M., Aldrete, A., Gómez-Guerrero, A., & Rodríguez-Trejo, D. A. (2023). Influence of fertilization on survival and growth of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. under nursery and field conditions. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 29*(1), 3–14. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2022.03.019

Hernández-Ramos, A., Valdez Lazalde, J. R., Ángeles-Pérez, G., Santos-Posadas, H. M., Hernández-Ramos, J., Peduzzi, A., & Carrero, O. (2021). Medición del índice de área foliar y su dinámica estacional en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *12*(63), 114-137. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i63.808

Kuan-Hung, L. I. N., Chun-Wei, W. U., & Yun-Sen, C. (2019). Applying Dickson quality index, chlorophyll fluorescence, and leaf area index for assessing plant quality of *Pentas lanceolata*. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *47*(1), 169-176. https://doi.org/10.15835/nbha47111312

López-Gómez, J. D., Villegas-Torres, O. G., Sotelo-Nava, H., Andrade-Rodríguez, M., Juárez-López, P., & Martínez Fernández, E. (2017). Yield and quality of habanero chili (*Capsicum chinense* Jacq.) by effect of nutritional regimen. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *8*(8), 1747-1758. https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.699

Luna-Fletes, J. A., Cruz-Crespo, E., & Can-Chulim, Á. (2021). Piedra pómez, tezontle y soluciones nutritivas en el cultivo de tomate cherry. *Terra Latinoamericana*, *39*. https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.781

Manzanilla-Quijada, G. E., Osuna-Vallejo, V., Gabriela Zacarías-Correa, A., Gómez-Pineda, E., Gallardo-Salazar, J. L., & Sáenz-Romero, C. (2024). Seed transfer zones for reforestation in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve and the Meseta Purépecha facing climate change. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 30*(2). https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2023.11.056

Moreno-Chávez, L. R., López-López, M. Á., Estañol-Botello, E., & Velázquez-Martínez, A. (2002). Diagnóstico de necesidades de fertilización de *Abies religiosa* (HBK) Schl. *et* Cham. en vivero mediante el DRIS. *Madera y Bosques*, *8*(1), 51-60. https://doi.org/10.21829/myb.2002.811305

Muñoz-Flores, H. J., Sáenz-Reyes, J. T., Coria-Avalos, V. M., García-Magaña, J. de J., Hernández-Ramos, J., & Manzanilla-Quijada, G. E. (2015). Calidad de planta en el vivero forestal La Dieta, Municipio Zitácuaro, Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *6*(27), 72-89. https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.282

Navarro-Sandoval, J. L., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Guerrero, A., Ruíz-Posadas, L. de M., & Sánchez-García, P. (2013). Morfología, biomasa y contenido nutrimental en *Abies religiosa* con regímenes diferentes de fertilización en vivero. *Agrociencia*, *47*(7), 707-721. https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1051/1051

Nzokou, P., & Cregg, B. M. (2010). Growth, biomass, and nitrogen use efficiency of containerized Fraser fir (*Abies fraseri*) as related to irrigation and nitrogen fertilization. *HortScience*, *45*(6), 946-951. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.6.946

Paz-Paz, M., Rodríguez-Trejo, D. A., Villanueva-Morales, A. & Borja-de la Rosa, M. A. M. (2023). Fertilización, calidad de planta y supervivencia en campo de *Pinus* spp. en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *14*(76), 71-92. https://doi.org/10.29298/rmcf.v14i76.1324

Pineda-Ojeda, T., Flores-Ayala, E., Flores, A., Buendía-Rodríguez, E., Guerra de la-Cruz, V., & Islas-Gutiérrez, F. (2020). Calidad de planta de seis especies del género *Pinus* producidas en bolsas de polietileno. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *11*(62), 165-174. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.809

Ramírez-Vargas, C. (2019). Extracción de nutrientes, crecimiento y producción del cultivo de pepino bajo sistema de cultivo protegido hidropónico. *Revista Tecnología en Marcha*, *32*(1), 107-117. https://doi.org/10.18845/tm.v32i1.4122

Rodríguez-Ortiz, G., Aragón-Peralta, R. D., Enríquez-del Valle, J. R., Hernández-Hernández, A., Santiago-García, W., & Campos-Angeles, G. V. (2020). Calidad de plántula de progenies selectas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *oaxacana* del sur de México. *Interciencia*, *45*(2), 96-101. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2020/03/05_6697_Com_Rodriguez_Ortiz_v45n2_6.pdf

Román-Jiménez, A. R., Vargas-Hernández, J. J., Baca-Castillo, G. A., Trinidad-Santos, A., & Alarcón-Bustamante, M. P. (2004). Crecimiento de plántulas de *Pinus greggii* Engelm. en respuesta a la fertilización. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *26*(89), 19-43. https://cienciasforestales.inifap.gob.mx/index.php/forestales/article/view/917/2171

Sáenz-Reyes, J., Muñoz Flores, H. J., Pérez, C. M. Á., 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

Sáenz-Reyes, J. T., Villaseñor-Ramírez, F.-J., Muñoz-Flores, H. J., Rueda-Sánchez, A., & Prieto-Ruíz, R. J. A. (2010). *Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán.* SAGARPA-INIFAP-CIRPAC.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods, 9*(7), 671–675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089

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), e2521784. https://doi.org/10.21829/myb.2019.2521784