

Growth and water potential for *Pinus patula* Schltdl. & Cham. seedlings in the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz

Crecimiento y potencial hídrico en brinzales de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en el ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz

Armando Falfán-Cortés; Alejandro Velázquez-Martínez*;
Valentín J. Reyes-Hernández; Aurelio M. Fierros-González;
Gustavo Ramírez-Valverde; J. Jesús Vargas-Hernández

Colegio de Postgraduados. km 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo. C. P. 56230. Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: alejvela@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1470.

Abstract

Introduction: Regeneration of forest stands under management is one of the most relevant silvicultural practices for forest cultivation.

Objective: To compare growth and water balance for both naturally regenerated and planted seedlings in *Pinus patula* Schltdl. & Cham. stands harvested with the seed tree method in the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Materials and methods: Four sites per stand with natural regeneration and planted seedlings were selected for paired comparison. Origin and age of seedlings were recorded at each site, water potential was measured throughout the day during the dry season in 2019, also annual height and diameter growth at the base of the stem during the period 2018-2019.

Results: Naturally regenerated seedlings had significantly ($P \leq 0.01$) higher annual height growth (73.8 ± 12.29 cm) compared to planted seedlings (60.8 ± 12.39 cm); the same was for diameter at stem base (20.52 ± 3.51 vs. 14.76 ± 3.54 mm). Natural regeneration also showed significantly higher ($P \leq 0.05$) diurnal water deficit recovery capacity (-0.90 MPa) compared to planted seedlings (-1.06 MPa).

Conclusion: *P. patula* naturally regenerated seedlings had better annual growth and better physiological performance in root, which allowed a faster recovery to diurnal water deficit in foliage.

Resumen

Introducción: La regeneración de rodales forestales bajo manejo es una de las prácticas silvícolas de mayor relevancia en el cultivo del bosque.

Objetivo: Comparar el crecimiento y el balance hídrico en brinzales de regeneración natural y de plantación en rodales de *Pinus patula* Schltdl. & Cham., cosechados con el método de árboles padre en el ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Materiales y métodos: Se seleccionaron cuatro sitios por rodal con brinzales establecidos por regeneración natural y plantación, para su comparación en forma apareada. En cada sitio se registró el origen y la edad de los brinzales, se midió el potencial hídrico a lo largo del día durante la temporada de sequía en el año 2019, y el crecimiento anual en altura y diámetro en la base del tallo durante el periodo 2018-2019.

Resultados: Los brinzales de regeneración natural mostraron crecimiento anual significativamente mayor ($P \leq 0.01$) en altura (73.8 ± 12.29 cm) que los brinzales por plantación (60.8 ± 12.39 cm); lo mismo ocurrió con el diámetro en la base del tallo (20.52 ± 3.51 vs. 14.76 ± 3.54 mm). Los brinzales de regeneración natural también mostraron capacidad de recuperación del déficit hídrico diurno (-0.90 MPa) significativamente mayor ($P \leq 0.05$) que los plantados (-1.06 MPa).

Conclusión: Los brinzales de regeneración natural de *P. patula* tuvieron mejor crecimiento dasométrico anual y mejor desempeño fisiológico en la raíz, la cual permitió una recuperación más rápida al déficit hídrico diurno en el follaje.

Keywords: Natural regeneration; tree seed methods; water deficit; forest plantations; post-planting stress.

Palabras clave: regeneración natural; árboles padre; déficit hídrico; plantación forestal; estrés posplantación.

Please cite this article as follows (APA 6): Falfán-Cortés, A., Velázquez-Martínez, A., Reyes-Hernández, V. J., Fierros-González, A. M., Ramírez-Valverde, G., & Vargas-Hernández, J. J. (2021). Growth and water potential for *Pinus patula* Schltdl. & Cham. seedlings in the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 27(2), 309-322. doi: 10.5154/r.rchscfa.2020.09.061

Received: September 24, 2020 / Accepted: April 6, 2021.



<http://revistas.chapingo.mx/forestales>

Introduction

Natural regeneration in forest stands under management is one of the most relevant silvicultural practices; to be successful it requires extensive knowledge of the factors involved in regeneration and making adequate site preparation (Nyland, Kenefic, Bohn, & Stout, 2016).

In Mexico, the seed tree regeneration method is applied in about 45 % of the forest area with a management program (Carrillo et al., 2017), while in some areas, the clear-cutting method with planting after cutting is applied. Successful works are known on natural regeneration using the parent tree method (Chacón-Sotelo, Velázquez-Martínez & Musálem, 1998; Hernández, Deras-Ávila, Deras-Ávila, & Colín, 2019); however, in many cases plantations are established after regeneration cutting and before to the growth season. This activity is not included in the rules for forest management in Mexico, because the use of forest plantations for a new stand is only considered when natural regeneration is not achieved after three years (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2005; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2006).

Several authors have evaluated seedling density after regeneration cutting (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009); the response of both naturally regenerated and planted seedlings after final cuts in even-aged stands (Kang, Shibuya, & Shin, 2014; Morales-González, López-Upton, Vargas-Hernández, Ramírez-Herrera, & Gil-Muñoz, 2013; Vargas & Vanegas, 2012; Yang, Yan, & Liu, 2014) and effects on different growth variables. Some studies indicate more growth and increase in biomass, height and diameter in seedlings from natural regeneration compared to planted seedlings after regeneration cutting, indicating that natural regeneration represents a productive alternative compared to planting (Fernández-Pérez, Ramírez-Marcial, & González-Espinosa, 2013; Hatzichristaki & Zagas, 2017; Otto, García-del-Rey, Méndez, & Fernández-Palacios, 2012; Pensado-Fernández, Sánchez-Velázquez, Pineda-López, & Díaz-Fleischer, 2014; Rebottaro & Cabrelli, 2007; Yang et al., 2014). On the other hand, in forested areas in Poland, a study by Dlugosiewicz, Zajac, and Wysocka-Fijorek (2019) indicated that individuals established through planting on wet sites have better growth characteristics, despite the fact that natural regeneration of *Pinus sylvestris* L. is abundant; however, the authors consider that natural regeneration is the best option when site conditions are favorable, since the high maintenance costs that a plantation requires.

Immediate planting after harvest can be an expensive practice, especially because of nursery plant production and planting costs (Dlugosiewicz, Zajac,

Introducción

La regeneración natural en rodales forestales bajo manejo es una de las prácticas silvícolas de mayor relevancia; para tener éxito se requiere conocimiento amplio de los factores que intervienen en el establecimiento de la regeneración y hacer una preparación adecuada del terreno (Nyland, Kenefic, Bohn, & Stout, 2016).

En México, el método de regeneración de árboles padre se aplica en, aproximadamente, 45 % de la superficie forestal con programa de manejo (Carrillo et al., 2017), mientras que en algunas áreas se aplica el método de matarrasa con plantación inmediata después de la corta. Se conocen trabajos exitosos en el establecimiento de la regeneración natural con el método de árboles padre (Chacón-Sotelo, Velázquez-Martínez & Musálem, 1998; Hernández, Deras-Ávila, Deras-Ávila, & Colín, 2019); sin embargo, en muchos casos se establecen plantaciones después de la corta de regeneración y previo al periodo de crecimiento. Dicha actividad no está contemplada en la normatividad que rige el manejo de bosques en México, ya que el uso de plantaciones forestales para el establecimiento del nuevo rodal solo está considerado cuando no se logra establecer la regeneración natural después de tres años (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, 2005; Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2006).

Diversos autores han evaluado la densidad de brinzales después de una corta de regeneración (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009); el establecimiento de la regeneración natural y de plantaciones después de las cortas finales en rodales coetáneos (Kang, Shibuya, & Shin, 2014; Morales-González, López-Upton, Vargas-Hernández, Ramírez-Herrera, & Gil-Muñoz, 2013; Vargas & Vanegas, 2012; Yang, Yan, & Liu, 2014) y los efectos de estas sobre diversas variables de crecimiento. Algunos estudios indican mayor crecimiento e incremento en biomasa, altura y diámetro en brinzales provenientes de regeneración natural que en los de plantación posterior a la corta de regeneración, lo que indica que la regeneración natural representa una alternativa productiva frente a la plantación (Fernández-Pérez, Ramírez-Marcial, & González-Espinosa, 2013; Hatzichristaki & Zagas, 2017; Otto, García-del-Rey, Méndez, & Fernández-Palacios, 2012; Pensado-Fernández, Sánchez-Velázquez, Pineda-López, & Díaz-Fleischer, 2014; Rebottaro & Cabrelli, 2007; Yang et al., 2014). Por otro lado, en áreas forestales en Polonia, el estudio de Dlugosiewicz, Zajac, y Wysocka-Fijorek (2019) indicó que los individuos establecidos a través de la plantación en sitios húmedos tienen mejores características de crecimiento, a pesar de que el establecimiento de la regeneración natural de *Pinus sylvestris* L. es abundante; sin embargo, los autores consideran que la regeneración natural es la mejor

Wysocka-Fijorek, & Sułkowska, 2019). Sometimes, field established seedlings show low survival and growth in subsequent years (Vargas & Vanegas, 2012). Post-planting stress of seedlings and low water availability are factors limiting success (Burney et al., 2015). In the ejido Carbonero Jacales located in the municipality of Huayacocotla, Veracruz, it has been observed that natural regeneration of *Pinus patula* Schltl. & Cham. shows better characteristics and higher abundance compared to planted seedlings (Romo-Guzmán, Valtierra-Pacheco, González-Guillén, Valdez-Lazalde, & Vivar-Miranda, 2016). In this context, the present study evaluates both naturally regenerated and planted seedlings in *P. patula* stands, harvested during the period 2014-2016, with the objective of comparing the annual height and diameter growth, as well as diurnal water balance of plants.

Materials and Methods

Study site

The study was conducted in the ejido Carbonero Jacales, belonging to the Forest Management Unit (UMAFOR) 3013 “Sierra de Huayacocotla”, located in the municipality of Huayacocotla, Veracruz, between the coordinates 20° 26' 01" north and 98° 27' 38" west (Figure 1). The region is located in the Sierra Madre Oriental. According to Köppen's climate classification, modified by García (2004), the climate in the region is temperate-humid [C(fm)] and sub-humid [C(w₀)(w) and C(w₂)]; the mean annual temperature is 14 °C with a mean annual precipitation of 1 333 mm (García, 2004).

According to the topographic map scale 1:50 000, the main soils are LVha+LVcr+ANmo/3 and CMcrlen+RGeulen/2, which correspond to luvisol and cambisol soils, respectively (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009). The dominant arboreal vegetation is pine-oyamel-oak conifer forest (Romo et al., 2016).

Sampling sites

Annual growth of naturally regenerated (NR) and planted (PA) plants was compared in a paired manner through targeted sampling in three stands harvested in 2014, 2015, and 2016 using the seed tree method (Figure 1). The stands were relatively homogeneous in exposure, slope, and elevation (Table 1). A total of four sites of 100 m² (10 m x 10 m) were selected at each stand, where NR and PA were present for paired comparison.

Plant measurements

Origin (NR or PA) and age of each *P. patula* seedlings was identified at each site. Natural regeneration

opción cuando las condiciones del sitio son favorables, en virtud de los altos costos de mantenimiento que una plantación requiere.

La plantación inmediata después de la cosecha puede ser una práctica costosa, especialmente por los costos de producción de planta en vivero y establecimiento en campo (Dlugosiewicz, Zając, Wysocka-Fijorek, & Sułkowska, 2019). En algunas ocasiones, las plantas establecidas en campo presentan supervivencia y crecimiento bajos en los años siguientes (Vargas & Vanegas, 2012). El estrés posplantación de los brinzales y la baja disponibilidad de agua son factores que limitan el éxito (Burney et al., 2015). En el ejido Carbonero Jacales ubicado en el municipio de Huayacocotla, estado de Veracruz, se ha observado que la regeneración natural de *Pinus patula* Schltl. & Cham. presenta mejores características de vigor y mayor abundancia en comparación con la plantación (Romo-Guzmán, Valtierra-Pacheco, González-Guillén, Valdez-Lazalde, & Vivar-Miranda, 2016). En este contexto, en el presente estudio se evaluaron brinzales establecidos por regeneración natural y plantación en rodales de *P. patula*, cosechados durante el periodo 2014-2016, con el objetivo de comparar el crecimiento anual en altura y diámetro, así como el balance hídrico diario de las plantas.

Materiales y métodos

Localización del estudio

El estudio se realizó en el ejido Carbonero Jacales, perteneciente a la Unidad de Manejo Forestal (UMAFOR) 3013 “Sierra de Huayacocotla”, ubicado en el municipio de Huayacocotla, Veracruz, entre las coordenadas 20° 26' 01" norte y 98° 27' 38" oeste (Figura 1). La región se encuentra en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), el clima en la región es templado húmedo [C(fm)] y subhúmedo [C(w₀)(w) y C(w₂)]; la temperatura media anual es 14 °C con una precipitación media anual de 1 333 mm (García, 2004).

De acuerdo con la carta topográfica escala 1:50 000, los suelos principales son LVha+LVcr+ANmo/3 y CMcrlen+RGeulen/2 que corresponden a suelos luvisol y cambisol, respectivamente (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2009). La vegetación arbórea dominante es el bosque de coníferas de pino-oyamel-encino (Romo et al., 2016).

Establecimiento de los sitios de muestreo

El crecimiento anual de las plantas de regeneración natural (RN) y plantación (PA) se comparó de manera apareada a través de un muestreo dirigido en tres

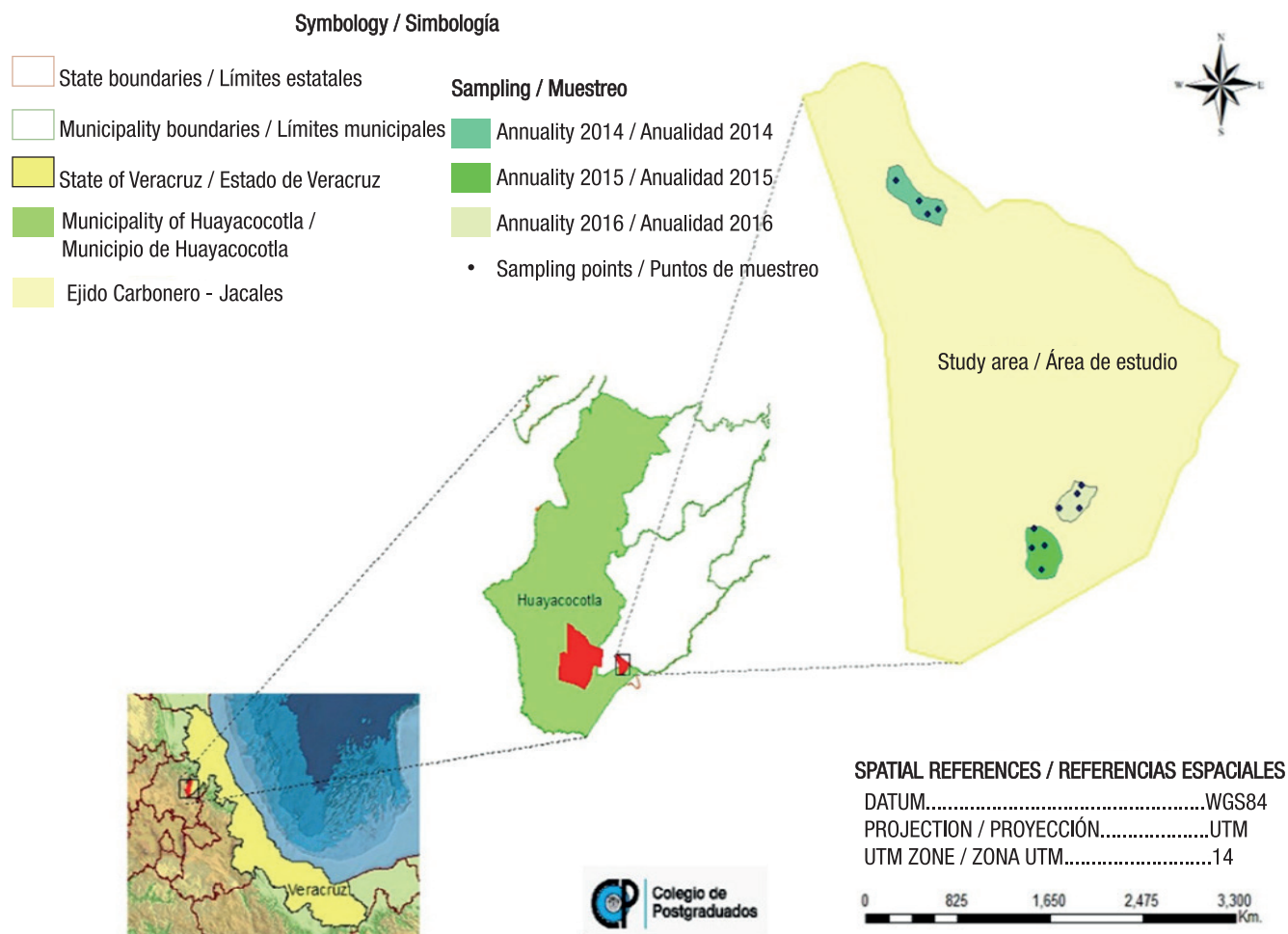


Figure 1. Location of regeneration cutting areas (2014, 2015 and 2016) of *Pinus patula* and study sites in the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Figura 1. Localización de las áreas de corta de regeneración (2014, 2015 y 2016) de *Pinus patula* y sitios de estudio en el ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Table 1. Physiographic characteristics of the *Pinus patula* stands studied in the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Cuadro 1. Características fisiográficas de los rodales estudiados de *Pinus patula* en el ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Year of harvest / Año de cosecha	Exposure / Exposición	Altitude (m) / Altitud (m)	Average slope (%) / Pendiente promedio (%)
2014	Northeast / Noreste	2 255	35
2015	Northeast / Noreste	2 354	35
2016	Northeast / Noreste	2 309	32

(NR) was characterized by being randomly distributed, while planted seedlings were uniformly distributed. The age of naturally established seedlings was obtained by counting growth rings by destructive sampling at the end of the study for all individuals, and for planted seedlings, the age considered was that corresponding to the harvest year of the stand.

Annual height and diameter growth was recorded during the period June 2018 to June 2019. Values were obtained from 368 seedlings from the three stands under study: 123 in the stand harvested in 2014 (73 NR and 50 PA), 130 in the stand harvested in 2015 (76 NR and 54 PA) and 115 in the stand harvested in 2016 (66 NR and 49 PA). Total height was obtained with a stadia and diameter at the stem base using a digital Vernier (Truper® U.S.A).

At the end of the drought period in 2019 (27 to 29 May), diurnal variation in plant water balance was evaluated. For this purpose, water potential (Ψ) was determined with a pressure chamber (PMS Instruments® Model 1000) with the procedure recommended by Cleary, Zaerr, and Hamel (2003). Three sampling points (blocks nested in sites) were established at each site to reduce the effects of spatial variability, where a seedling from each origin (NR and PA) was located to allow paired comparison. Three daily measurements were made on the twigs of each individual sampled, with a total of six individuals per site (three NR and three PA): A total of 24 seedlings from the stand harvested in 2014 were measured on 27 May; 24 from the stand harvested on May 28, 2015; and 24 from the stand harvested on May 29, 2016. The first diurnal measurement was carried out before sunrise (4:00-6:30), when seedlings are more hydrated; the second measurement was at midday (12:00-14:00), when these reduce hydration level due to evapotranspiration; and the third measurement was in the afternoon (17:30-20:00) to evaluate the capacity for immediate recovery of the water deficit presented during the day.

From May to September 2019, soil samples were taken monthly to determine the moisture content using the gravimetric method (AS-05) of the NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Soil samples were taken at the center of the 12 sites located within the three stands, at a depth of 10 cm of mineral soil. Samples were collected with a Truper® garden shovel and placed in double Ziploc® brand bags to avoid water loss. The samples were transferred to the soil laboratory of the Soil Science Postgraduate Program of the Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. Fresh weight of each sample was determined with an analytical balance to the nearest 0.01 g, dried at 105 °C for 24 hours in a drying oven and dry weight was recorded.

rodas cosechados en 2014, 2015 y 2016 con el método de árboles padre (Figura 1). Los rodales fueron relativamente homogéneos en exposición, pendiente y elevación (Cuadro 1). En cada rodal se seleccionaron cuatro sitios de 100 m² (10 m x 10 m) donde se tuviera RN y PA, para comparar en forma apareada.

Medición de las plantas

En cada sitio se identificó el origen (RN o PA) y edad de cada brinzal de *P. patula*. Los brinzales provenientes de RN se caracterizaron por estar distribuidos aleatoriamente, mientras que los brinzales plantados se distribuyeron uniformemente. La edad de los brinzales establecidos naturalmente se obtuvo contando los anillos de crecimiento mediante un muestreo destructivo realizado al final del estudio en todos los individuos, y para los plantados, la edad considerada fue la correspondiente a partir del año de cosecha del rodal.

El crecimiento anual en altura y diámetro se registró durante el periodo junio de 2018 a junio de 2019. Los valores se obtuvieron de 368 brinzales de los tres rodales bajo estudio: 123 en el rodal cosechado en 2014 (73 de RN y 50 de PA), 130 en el rodal cosechado en 2015 (76 de RN y 54 de PA) y 115 en el rodal cosechado en 2016 (66 de RN y 49 de PA). La altura total se obtuvo con un estadal y el diámetro en la base del tallo con un vernier digital (Truper®, EUA).

A finales del periodo de sequía en 2019 (27 a 29 de mayo) se evaluó la variación diurna en el balance hídrico de las plantas. Para ello se determinó el potencial hídrico (Ψ) con una cámara de presión (PMS Instruments® modelo 1000) con el procedimiento recomendado por Cleary, Zaerr, y Hamel (2003). En cada sitio se establecieron tres puntos de muestreo (bloques anidados en sitios) para reducir los efectos de la variabilidad espacial, en los que se ubicó un brinzal de cada origen (RN y PA) que permitiera su comparación apareada. Se realizaron tres mediciones diarias en las ramillas de cada individuo muestreado, con un total de seis individuos por sitio (tres de RN y tres de PA): el 27 de mayo se midieron los 24 brinzales del rodal cosechado en 2014; el 28 de mayo, los 24 brinzales del rodal 2015; y el 29 de mayo, los 24 brinzales del rodal 2016. La primera medición diurna se hizo antes de la salida del sol (4:00-6:30), cuando los brinzales se encuentran más hidratados; la segunda al mediodía (12:00-14:00), cuando los brinzales reducen su nivel de hidratación, debido a la evapotranspiración; y la tercera en la tarde (17:30-20:00), para evaluar la capacidad de recuperación inmediata del déficit hídrico presentado durante el día.

En el periodo de mayo a septiembre de 2019, se tomaron muestras de suelo mensualmente para determinar el

Statistical analysis

Hypothesis tests were performed to compare the means of the two plant origins (NR and PA) in height and diameter growth at the base of the stem, according to the age of the seedlings. Hypothesis tests were carried out with the statistical analysis package R, version 4.0.1. (R Development Core Team, 2015), by means of generalized linear mixed models (GLMM), using the lme4 program; in addition, a comparison of means was performed using the least significant difference (LSD) with significance level $\alpha = 0.05$. The analysis model included age (X_i) and origin (O_j) as fixed effect factors, and stand (R_k) and sampling site (S_l) as random effect factors. The model used was as follows:

$$y_{ijklm} = \mu + \beta(x_i - \bar{x}) + O_j + R_k + S_l + E_{ijklm}$$

where,

μ = overall mean

β = slope with the effect of the covariate age

E_{ijklm} = error.

Water potential data (Ψ) was analyzed with a mixed-effects model with repeated measures, using the MIXED procedure of the SAS version V.9.4, for Windows (Statistical Analysis Systems Institute Inc., 2013). A Tukey's mean comparison test ($\alpha = 0.05$) was also performed. The model included origin (O_i), time of day (H_j) and interaction (OH_{ij}) as fixed effects factors, and stand (R_k), site (S_l) and blocks (B_m) within them as random effects factors. The model used was the following:

$$y_{ijklm} = \mu + O_i + H_j + OH_{ij} + R_k + S_l + B_m + E_{ijklm}$$

where,

μ = overall mean

E_{ijklm} = error.

Results and Discussion

Plant growth

The results indicate that height growth and basal stem diameter (Table 2) were significantly different ($P < 0.05$) between the two origins, after adjusting the data for seedling age. The average age was four years.

Naturally regenerated seedlings had greater mean annual height growth (73.8 ± 12.3 cm) compared to planted seedlings (60.8 ± 12.4 cm) (Figure 2A). On the other hand, variation in height was lower for naturally regenerated seedlings than planted ones (Figure 2B), indicating greater consistency in growth of natural regeneration.

contenido de humedad con el método gravimétrico (AS-05) de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Las muestras de suelo se tomaron al centro de los 12 sitios ubicados dentro de los tres rodales, a una profundidad de 10 cm del suelo mineral. Las muestras se recolectaron con una pala recta marca Truper® y se colocaron en bolsas de doble cierre marca Ziploc® para evitar la pérdida de agua. Las muestras se trasladaron al laboratorio de suelos del Posgrado en Edafología del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo. El peso fresco de cada muestra se determinó con una balanza analítica con aproximación de 0.01 g, se secó a 105 °C por 24 horas en un horno de secado y se obtuvo el peso seco.

Análisis estadístico

Se realizaron pruebas de hipótesis para comparar las medias de los dos orígenes de planta (RN y PA) en el crecimiento en altura y diámetro en la base del tallo, ajustado por la edad de los brinzales. Las pruebas de hipótesis se realizaron con el paquete de análisis estadístico R, versión 4.0.1. (R Development Core Team, 2015), mediante modelos lineales generalizados mixtos (GLMM), empleando el programa lme4; además, se realizó una comparación de medias mediante la diferencia mínima significativa (DMS) con nivel de significancia $\alpha = 0.05$. El modelo de análisis consideró la edad (X_i) y origen (O_j) como factores de efectos fijos, y al rodal (R_k) y sitio de muestreo (S_l) como factores de efectos aleatorios. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$y_{ijklm} = \mu + \beta(x_i - \bar{x}) + O_j + R_k + S_l + E_{ijklm}$$

donde,

μ = media general

β = pendiente con el efecto de la covariable edad

E_{ijklm} = error.

Los datos de potencial hídrico (Ψ) se analizaron con un modelo de efectos mixtos con medidas repetidas, utilizando el procedimiento MIXED del paquete SAS versión V.9.4, para Windows (Statistical Analysis Systems Institute Inc., 2013). También se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$). El modelo consideró al origen (O_i), la hora del día (H_j) y su interacción (OH_{ij}) como factores de efectos fijos, y al rodal (R_k), el sitio (S_l) y los bloques (B_m) dentro de ellos como factores de efectos aleatorios. El modelo empleado fue el siguiente:

$$y_{ijklm} = \mu + O_i + H_j + OH_{ij} + R_k + S_l + B_m + E_{ijklm}$$

donde,

μ = media general

E_{ijklm} = error.

Table 2. Hypothesis test on the fixed effects of origin (naturally regenerated and planted seedlings) and age (4 years on average), for the variables of height and diameter growth at the base of the stem (DBS) in *Pinus patula* seedlings in the extension of the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Cuadro 2. Prueba de hipótesis sobre los efectos fijos origen (regeneración natural y plantación) y edad (4 años en promedio), para las variables de crecimiento en altura y diámetro en la base del tallo (DBT) en brinzales de *Pinus patula* en la ampliación del ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Variable	Factor	Numerator DF/ GL numerador	Denominator DF/ GL denominador	F	P
Height/Altura	Origin/Origen	1	354	9.99	0.0017
	Age/Edad	1	354	46.20	<0.0001
DBS/DBT	Origin/Origen	1	354	23.90	<0.0001
	Age/Edad	1	354	67.16	<0.0001

DF = degrees of freedom

GL = grados de libertad

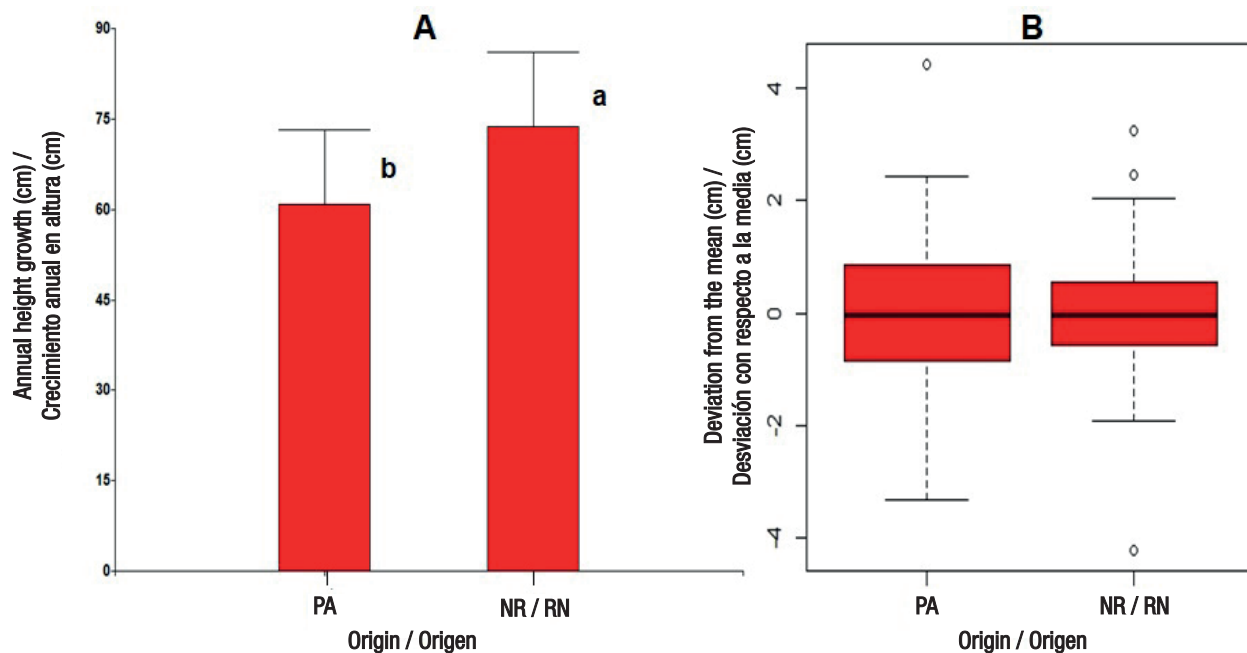


Figure 2. Comparison of annual height growth (A) and variability (B) in naturally regenerated (NR) and planted seedlings (PA) of *Pinus patula* in the extension of the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. Different letters indicate significant differences (DMS; $P = 0.05$).

Figura 2. Comparación del crecimiento anual en altura (A) y variabilidad (B) en brinzales de regeneración natural (RN) y plantación (PA) de *Pinus patula* en la ampliación del ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. Letras diferentes indican diferencias significativas (DMS; $P = 0.05$).

This trend has been observed by Rebottaro and Cabrelli (2007), who evaluated *Pinus elliotii* Engelm. seedlings and found that the annual height growth of planted seedlings (80 ± 19.2 cm) was lower compared to natural regeneration (143.2 ± 26.6 cm). On the other hand, Pensado-Fernández et al. (2014), in Perote, Veracruz, compared the annual height growth rate of *Pinus* seedlings and recorded higher growth for natural regeneration (1.55 ± 0.1 cm) compared to planted

Resultados y discusión

Crecimiento de las plantas

Los resultados indican que el crecimiento en altura y diámetro basal del tallo (Cuadro 2) fueron significativamente diferentes ($P < 0.05$) entre los dos orígenes, después de ajustar los datos por la edad de los brinzales. La edad promedio fue de cuatro años.

seedlings (1.1 ± 0.05 cm). Similar results of height growth in both origins of seedlings have been obtained by Otto et al. (2012) for *Pinus canariensis* C. Sm. ex DC. and by Fernández-Pérez et al. (2013) for *Cupressus lusitanica* Mill.

Natural regeneration also showed higher annual diameter growth (20.5 ± 3.5 mm) compared to planted seedlings (14.8 ± 3.5 mm) (Figure 3A). The trend is similar to that of height growth in terms of variability within each seedling origin (Figure 3B).

Several authors have found a similar growth pattern in other species; that is, greater diameter growth for naturally regenerated seedlings compared to planted ones (Hatzichristaki & Zagas, 2017; Pensado-Fernández et al., 2014; Rebottaro & Cabrelli, 2007; Yang et al., 2014). The above could be explained by the fact that natural regeneration comes from the seed trees adapted to local environmental conditions and the advantage of increased taproot development from the moment seed germination occurs on site (Gómez-Cárdenas, Vargas-Hernández, Jasso-Mata, Velázquez-Martínez, & Rodríguez-Franco, 1998; Wakamiya-Noborio, Heilman,

Los brinzales provenientes de regeneración natural presentaron mayor crecimiento medio anual en altura (73.8 ± 12.3 cm) en comparación con los brinzales plantados (60.8 ± 12.4 cm) (Figura 2A). Por otro lado, la variación en altura fue menor en la regeneración natural que en los brinzales plantados (Figura 2B), lo cual indica mayor uniformidad en el crecimiento de la regeneración natural.

Esta tendencia ha sido observada por Rebottaro y Cabrelli (2007), quienes evaluaron brinzales de *Pinus elliotii* Engelm. y encontraron que el crecimiento anual en altura de brinzales plantados (80 ± 19.2 cm) fue menor que en los provenientes de regeneración natural (143.2 ± 26.6 cm). Por otro lado, Pensado-Fernández et al. (2014), en Perote, Veracruz, compararon la tasa de crecimiento anual en altura en brinzales de *Pinus* y registraron mayor crecimiento en los provenientes de regeneración natural (1.55 ± 0.1 cm) que en aquellos que fueron plantados (1.1 ± 0.05 cm). Resultados similares del crecimiento en altura en ambos orígenes de brinzales han sido obtenidos por Otto et al. (2012) en *Pinus canariensis* C. Sm. ex DC. y por Fernández-Pérez et al. (2013) en *Cupressus lusitanica* Mill.

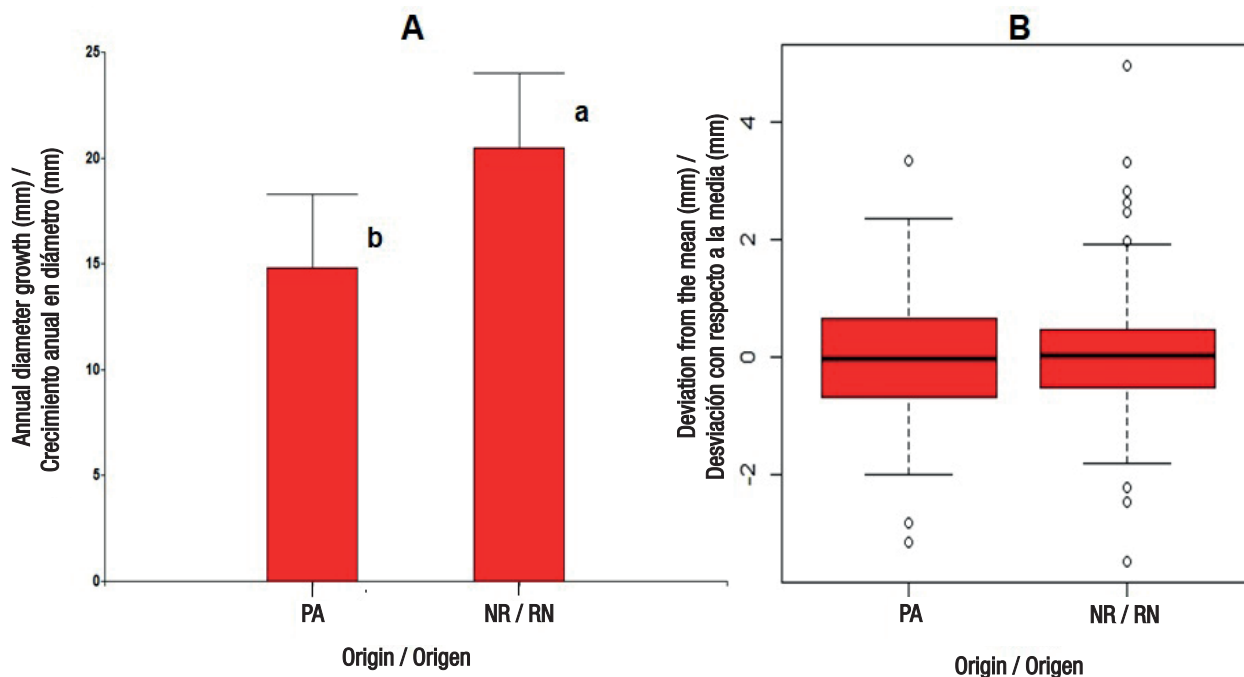


Figure 3. Comparison of annual diameter growth at the base of the stem (A) and variability (B) in naturally regenerated (NR) and planted seedlings (PA) of *Pinus patula* in the extension of the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. Different letters indicate significant differences (DMS; $P = 0.05$).

Figura 3. Comparación del crecimiento anual en diámetro en la base del tallo (A) y variabilidad (B) en brinzales de regeneración natural (RN) y plantación (PA) de *Pinus patula* en la ampliación del ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz. Letras diferentes indican diferencias significativas (DMS; $P = 0.05$).

Newton, & Messina, 1999); therefore, seedlings have the same local adaptation characteristics as the parents, from a genetic and physiological point of view (Harrington, Brissette, & Carlson, 1989). In the case of the planted seedlings in the evaluated stands, it is not known if seeds comes from the same harvested stand.

In the case of natural regeneration, there is a selection process in the establishment stage, since, after germination, seedlings are exposed to various biotic and abiotic threats that limit their survival, causing only a few individuals to succeed. Moreover, competition for resources with herbaceous and shrub vegetation is high in the first years of natural regeneration (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009), which increases the intensity of natural selection (Długosiewicz et al., 2019). Seedling and sapling stages are the most critical stages in the life cycle of a woody plant (Padilla-Ruíz, 2008) and only the fittest individuals or those facing the least competition survive.

The better performance of natural regeneration can also be explained by the fact that it was established directly on the ground and, therefore, there is no post-planting stress stage, as is the case with seedlings produced in nursery and transplanted to the ground (Burney et al., 2015).

Water potential

The Ψ of seedlings from both origins showed significant differences ($P \leq 0.05$) throughout the day and interaction origin*time of day (Table 3). Tukey's test confirms that differences in Ψ during the day are only apparent in the measurement at sunset (Figure 4).

The minimum values of Ψ at midday (-1.45 MPa) in the seedlings of the two origins are due to the effect of transpiration during the morning. The two types of seedlings recovered their water potential during the afternoon, according to the measurement made at sunset, which is a physiological response that has been widely documented, associated with a partial closure of stomata to reduce transpiration and increased water conduction within the plant (Agudelo-Castañeda, Cadena-Torres, Almanza-Merchán, & Pinzón-Sandoval, 2018; Moreno, 2009); however, naturally regenerated seedlings had higher efficiency in their evening recovery with average Ψ of -0.90 MPa, while planted seedlings had an average Ψ of -1.06 MPa (Figure 4).

The greater recovery capacity of Ψ for the natural regeneration of *P. patula* may be associated with a more developed and efficient root system on soil water absorption (Aguilar-Muniz, Cruz-Medrano, Velázquez-Martínez, & Vargas-Hernández, 1992). The greatest efficiency could be due to a significant interaction

Los brinzales de regeneración natural también presentaron mayor crecimiento anual en diámetro (20.5 ± 3.5 mm) en comparación con los de plantación (14.8 ± 3.5 mm) (Figura 3A). La tendencia es similar a la que presentó el crecimiento en altura en cuanto a la variabilidad dentro de cada origen de brinzales (Figura 3B).

Diversos autores han encontrado un patrón similar de crecimiento en otras especies; es decir, mayor crecimiento en el diámetro de brinzales establecidos por regeneración natural que por plantación (Hatzichristaki & Zagas, 2017; Pensado-Fernández et al., 2014; Rebottaro & Cabrelli, 2007; Yang et al., 2014). Lo anterior pudiera ser explicado por el hecho de que la regeneración natural proviene de los árboles padre adaptados a las condiciones ambientales locales y con la ventaja del mayor desarrollo de la raíz principal desde el momento en que la germinación de la semilla ocurre en el sitio (Gómez-Cárdenas, Vargas-Hernández, Jasso-Mata, Velázquez-Martínez, & Rodríguez-Franco, 1998; Wakamiya-Noborio, Heilman, Newton, & Messina, 1999); en consecuencia, los brinzales presentan las mismas características de adaptación local que los padres, desde el punto de vista genético y fisiológico (Harrington, Brissette, & Carlson, 1989). En el caso de los brinzales plantados en los rodales evaluados, se desconoce si efectivamente el germoplasma procede del mismo rodal cosechado.

Adicionalmente, en el caso de la regeneración natural hay un proceso de selección en la etapa de establecimiento, ya que, después de la germinación, las plántulas están expuestas a diversas amenazas bióticas y abióticas que limitan su supervivencia, provocando que solo unos individuos consigan establecerse. Por otra parte, la competencia por recursos con la vegetación herbácea y arbustiva es elevada en los primeros años del establecimiento de la regeneración natural (Castelán-Lorenzo & Arteaga-Martínez, 2009), lo que aumenta la intensidad de selección natural (Długosiewicz et al., 2019). Las fases de plántula y brinzal son las etapas más críticas en el ciclo de vida de una planta leñosa (Padilla-Ruíz, 2008) y solo sobreviven los individuos más aptos o los que enfrentan menor competencia.

El mejor desempeño de la regeneración natural también puede explicarse por el hecho de que se estableció directamente en el terreno y, por lo tanto, no pasa por una etapa de estrés posplantación, como ocurre con los brinzales producidos en vivero y trasplantados al terreno (Burney et al., 2015).

Potencial hídrico

El Ψ de los brinzales de ambos orígenes mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) a lo largo del día

Table 3. Hypothesis test on fixed effects of origin (natural regeneration and planted seedlings), time of day (5:00, 13:00 and 19:00 h) and interaction on the variable water potential of *Pinus patula* seedlings in the extension of the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Cuadro 3. Prueba de hipótesis sobre efectos fijos del origen (regeneración natural y plantación), hora del día (5:00, 13:00 y 19:00 h) y su interacción en la variable potencial hídrico de brinzales de *Pinus patula* en la ampliación del ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Effect/Efecto	Numerator DF/ GL numerador	Denominator DF/ GL denominador	F	P
Origin/Origen	1	70	1.87	0.1758
Time of day (h)/Hora del día (h)	2	140	282.36	<0.0001
Origin*time of day/Origen*hora	2	140	3.44	0.0347

DF = degrees of freedom.

GL = grados de libertad.

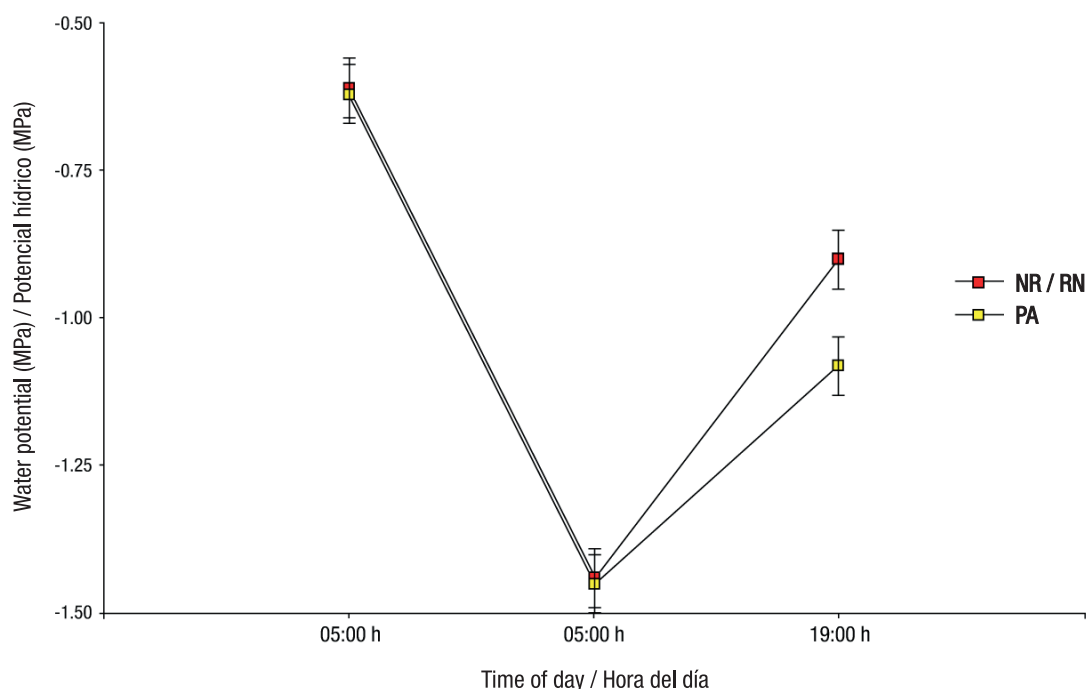


Figure 4. Water potential at different times of the day for naturally regenerated (NR) and planted seedlings (PA) of *Pinus patula* in the extension of the ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

Figura 4. Potencial hídrico a diferentes horas del día en brinzales de regeneración natural (RN) y de plantación (PA) de *Pinus patula* en la ampliación del ejido Carbonero Jacales, Huayacocotla, Veracruz.

with mycorrhizal fungi that increase the contact surface with soil matrix and water absorption capacity and nutrients from deeper layers (Demelash, Dejene, Oria de Rueda, Geml, & Martin-Pinto, 2020; South & Zwolinski, 1997).

Some studies have evaluated the repercussions on plant development and growth associated with reduced Ψ values (Luna-Flores, Estrada-Medina, Jiménez-Osornio, & Pinzón-López, 2012; Singh & Singh, 2006). Those studies conclude that when Ψ

and in the interaction origin*hour of the day (Cuadro 3). The Tukey test confirms that the differences in Ψ during the day, only manifest themselves in the measurement at dusk (Figure 4).

Los valores mínimos de Ψ al mediodía (-1.45 MPa) en los brinzales de los dos orígenes se deben al efecto de la transpiración en el transcurso de la mañana. Los dos tipos de brinzal recuperaron su potencial hídrico durante la tarde, de acuerdo con la medición realizada a la puesta del sol, lo cual es una repuesta fisiológica

values close to -1.5 MPa are reached, light stress occurs, but as Ψ decreases, physiological stress in the plant gradually increases, resulting in stomata closure, reduced photosynthetic rate and, consequently, decreased growth.

On the other hand, several studies have analyzed the impact on seedling and sapling growth under different soil moisture conditions (Martíñón-Martínez, Vargas-Hernández, Gómez-Guerrero, & López-Upton, 2011; Martíñón-Martínez, Vargas-Hernández, López-Upton, Gómez-Guerrero, & Vaquera-Huerta, 2010; May-Lara, Pérez-Gutiérrez, Ruiz-Sánchez, Ic-Caamal, & García-Ramírez, 2011). Studies reveal there are conditions that favor seedling growth when moisture content is higher and acceptable levels of usable water are maintained.

In the present study, the lowest values of Ψ at midday (-1.45 MPa) were obtained during the period of greatest drought (May), when the average moisture content at a depth of 10 cm in the mineral soil was 31 % (Figure 5). In the following months, the average soil moisture gradually increased to 70 % in September.

Variation in soil moisture content reflects the rainfall and climate pattern of the region. In September,

que ha sido documentada ampliamente, asociada a un cierre parcial de estomas para reducir la transpiración y al aumento en la conducción de agua dentro de la planta (Agudelo-Castañeda, Cadena-Torres, Almanza-Merchán, & Pinzón-Sandoval, 2018; Moreno, 2009); sin embargo, los brinzales originados por regeneración natural tuvieron mayor eficiencia en su recuperación vespertina con Ψ promedio de -0.90 MPa, mientras que los brinzales de plantación presentaron Ψ promedio de -1.06 MPa (Figura 4).

La mayor capacidad de recuperación del Ψ en los brinzales de la regeneración natural de *P. patula* puede estar asociada con un sistema radical más desarrollado y eficiente en la absorción de agua del suelo (Aguilar-Muniz, Cruz-Medrano, Velázquez-Martínez, & Vargas-Hernández, 1992). La mayor eficiencia podría deberse a una interacción significativa con los hongos micorrícicos que aumentan la superficie de contacto con la matriz del suelo y la capacidad de absorción de agua y nutrientes de capas más profundas (Demelash, Dejene, Oria de Rueda, Geml, & Martin-Pinto, 2020; South & Zwolinski, 1997).

Algunos estudios han evaluado las repercusiones en el desarrollo y crecimiento de las plantas asociados a la reducción en los valores de Ψ (Luna-Flores, Estrada-

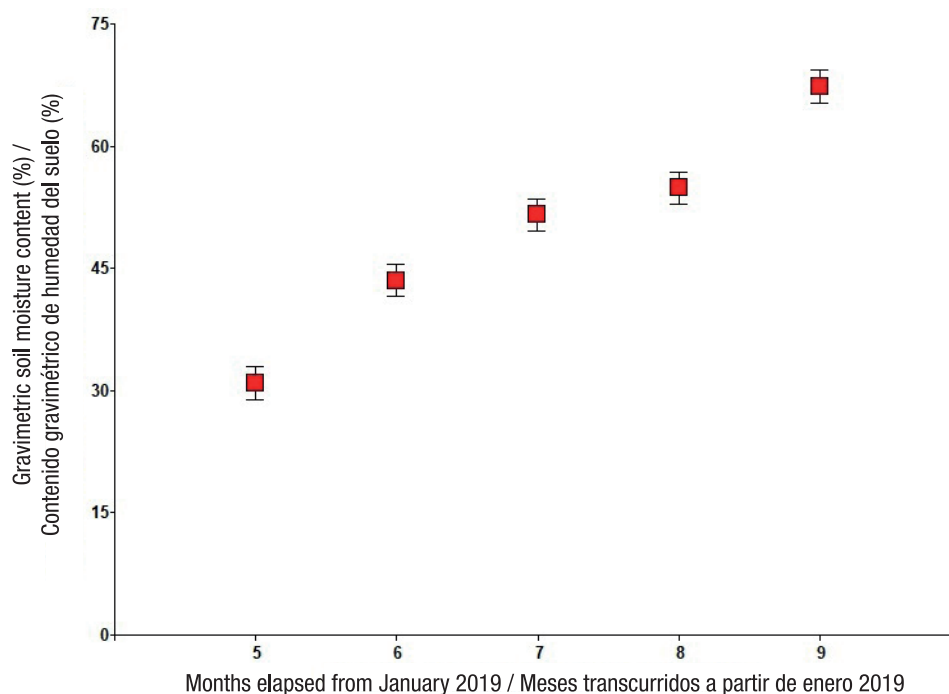


Figure 5. Gravimetric soil moisture content, from the end of the dry season (May) to the first part of the summer rainy season (September), for *Pinus patula* stands sampled in the extension of the ejido Carbonero Jcales, Huayacocotla, Veracruz.

Figura 5. Contenido gravimétrico de humedad del suelo, desde finales de la estación seca (mayo) hasta la primera parte del periodo de lluvias en verano (septiembre), en los rodales de *Pinus patula* muestreados en la ampliación del ejido Carbonero Jcales, Huayacocotla, Veracruz.

moisture content in some sites almost tripled with respect to the values at the beginning of the sampling period in May. During the rainy period, the water potential of the seedlings was not evaluated, which limited the possibility of establishing seasonal differences in the water response. This allows us to assume that the greatest differences between the two origins of seedlings occur during the drought period. Studies by Moreno (2009) and Martiñón-Martínez et al. (2010, 2011) show that differences in water potential are more likely to be detected in woody plants during the drought period.

Conclusions

The natural regeneration of *Pinus patula* had greater annual height and diameter growth at the base of the stem compared to planted seedlings. This could be attributed to the fact that there was probably no plant selection during the nursery propagation process or adequate management in the plantation, which could have affected growth. Results suggest that natural regeneration has better physiological performance in root that allows faster recovery of diurnal water deficit in foliage, with respect to planted seedlings. Measuring water potential is the best way to indicate that planted seedlings had growth problems associated with post-planting stress because recovery was slower throughout the day.

Acknowledgments

The authors thank CONACYT for the Master Science grant to the first author to carry out this research.

End of English version

References / Referencias

- Agudelo-Castañeda, G. A., Cadena-Torres, J., Almanza-Merchán, P. J., & Pinzón-Sandoval, E. H. (2018). Desempeño fisiológico de nueve genotipos de cacao (*Theobroma cacao* L.) bajo la sombra de tres especies forestales en Santander, Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 223–232. doi: 10.17584/rcch.2018v12i1.7341
- Aguilar-Muniz, J. C., Cruz-Medrano, L., Velázquez-Martínez, A., & Vargas-Hernández, J. J. (1992). Silvicultural and ecological relationships in *Pinus patula* and *Baccharis conferta* natural regeneration. *Agrociencia Serie Recursos Naturales Renovables*, 2(1), 27–39. Retrieved from <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=MX9700240>
- Burney, O., Aldrete, A., Álvarez, R. R., Prieto, R. J. A., Sánchez, V. J. R., & Mexal, J. G. (2015). México-Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, 113(4), 404–413. doi: 10.5849/jof.14-007

Medina, Jiménez-Osornio, & Pinzón-López, 2012; Singh & Singh, 2006). Dichos estudios concluyen que cuando se alcanzan valores de Ψ cercanos a -1.5 MPa se produce estrés ligero, pero a medida que Ψ desciende, el estrés fisiológico en la planta incrementa gradualmente, lo que se traduce en el cierre de estomas, reducción de la tasa de fotosíntesis y, en consecuencia, la disminución del crecimiento.

Por otro lado, diversos estudios han analizado la repercusión en el crecimiento de plántulas y brinzales en varias condiciones de humedad en el suelo (Martiñón-Martínez, Vargas-Hernández, Gómez-Guerrero, & López-Upton, 2011; Martiñón-Martínez, Vargas-Hernández, López-Upton, Gómez-Guerrero, & Vaquera-Huerta, 2010; May-Lara, Pérez-Gutiérrez, Ruiz-Sánchez, Ic-Caamal, & García-Ramírez, 2011). Los estudios revelan que existen condiciones que favorecen el crecimiento de los brinzales cuando el contenido de humedad es mayor y se mantienen niveles aceptables de agua aprovechable.

En el presente estudio, los valores menores de Ψ al mediodía (-1.45 MPa) se obtuvieron durante el periodo de mayor sequía (mayo), cuando el contenido promedio de humedad a una profundidad de 10 cm en el suelo mineral era de 31 % (Figura 5). En los meses siguientes, la humedad promedio del suelo aumentó gradualmente hasta obtener 70 % en septiembre.

La variación en el contenido de humedad del suelo refleja el patrón de lluvias y clima de la región. En septiembre, el contenido de humedad en algunos sitios casi se triplicó con respecto a los valores del inicio del periodo de muestreo en el mes de mayo. Durante el periodo de lluvias no se evaluó el potencial hídrico de los brinzales, lo que limitó la posibilidad de establecer diferencias estacionales en la repuesta hídrica. Lo anterior permite asumir que las mayores diferencias entre los dos orígenes de los brinzales ocurren durante el periodo de sequía. Estudios realizados por Moreno (2009) y Martiñón-Martínez et al. (2010, 2011) muestran que es más probable detectar diferencias en el potencial hídrico en las plantas leñosas durante el periodo de sequía.

Conclusiones

La regeneración natural de *Pinus patula* tuvo mayor crecimiento anual en altura y diámetro en la base del tallo que los brinzales establecidos por plantación. Lo anterior se pudiera atribuir a que probablemente no existió selección de planta durante el proceso de reproducción en vivero ni manejo adecuado en la plantación, lo que pudo haber afectado el crecimiento. Los resultados sugieren que la regeneración natural tiene mejor desempeño fisiológico en la raíz que permite la recuperación más rápida del déficit hídrico

- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión (2005). Reglamento de la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3269/1/reglamento_de_la_ley_general_de_desarrollo_forestal_sustentable.pdf
- Castelán-Lorenzo, M., & Arteaga-Martínez, B. (2009). Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método árboles padres. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(1), 49–57. Retrieved from <https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=39&articulo=506>
- Carrillo, A. F., Acosta, M. M., Flores, A. E., Torres, R. J. M., Sangerman-Jarquín, D. M., González, M. L., & Buendía, R. E. (2017). Caracterización de productores forestales en 12 estados de la República Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), 1561–1573. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v8n7/2007-0934-remexca-8-07-1561.pdf>
- Chacón-Sotelo, J. M., Velázquez-Martínez, A., & Musálem, M. A. (1998). Comportamiento de la repoblación natural de *Pinus arizonica* Engelm., bajo diferentes coberturas. *Madera y Bosques*, 4(2), 39–44. doi: 10.21829/myb.1998.421358
- Cleary, B., Zaerr, J., & Hamel, J. (2003). Guidelines for measuring plant moisture stress with a pressure chamber. Retrieved from https://www.pmsinstrument.com/wp-content/uploads/Model_1000_Operating_Instructions.pdf
- Demelash, A., Dejene, T., Oria-de-Rueda, J. A., Geml, J., & Martín-Pinto, P. (2020). Soil fungal communities under *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. plantation forests of different ages in Ethiopia. *Forests*, 11(10), 1109. doi: 10.3390/f11101109
- Długosiewicz, J., Zając, E., & Wysocka-Fijore, E. (2019). Evaluation of the natural and artificial regeneration of Scots pine *Pinus sylvestris* L. stands in the Forest District. Nowa D–ba. *Forest Research Papers*, 80(20), 105–116. doi: 10.2478/frp-2019-0009
- Długosiewicz, J., Zając, E., Wysocka-Fijore, E., & Sułkowska, M. (2019). Comparative analysis of natural and artificial regeneration in Nowa D–ba Forest District. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 61(3), 230–240. doi: 10.2478/ffp-2019-0022
- Fernández-Pérez, L., Ramírez-Marcial, N., & González-Espinosa, M. (2013). Reforestación con *Cupressus lusitanica* y su influencia en la diversidad del bosque de pino-encino en Los Altos de Chiapas, México. *Botanical Sciences*, 91(2), 207–216. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982013000200008&lng=es&tlng=es
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Retrieved from <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Gómez-Cárdenas, M., Vargas-Hernández, J. J., Jasso-Mata, J., Velázquez-Martínez, A., & Rodríguez-Franco, C. (1998). Annual growth pattern of the terminal shoot in young trees of *Pinus patula*. *Agrociencia*, 32(4), 357–364. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/266391132_Patron_de_crecimiento_anual_del_brote_terminal_en_arboles_jovenes_de_Pinus_patula/link/568aaea08ae1975839d9e4b/download
- Harrington, C. A., Brissette, J. C., & Carlson, W. C. (1989). Root system structure in planted and seeded loblolly and shortleaf pine. *Forest Science*, 35(2), 469–480. doi: 10.1093/forestscience/35.2.469
- Hatzichristaki, Ch., & Zagaz, Th. (2017). The contribution of natural and artificial regeneration at the restoration of fire-affected peri-urban forest of Thessaloniki (Northern Greece). *Global NEST*, 19(1), 29–36. doi: 10.30955/gnj.001758
- Hernández, F., Deras-Ávila, A. G., Deras-Ávila, N. I., Colín, J. C. (2019). Influence of the seed tree method on the diversity of regeneration in a mixed forest in Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 25(2), 219–234. doi: 10.5154/rchscfa.2018.09.066
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). Información topográfica digital escala 1: 50 000. México: Author.
- Kang, J. S., Shibuya, M., & Shin, C. S. (2014). The effect of forest-thinning works on tree growth and forest environment. *Forest Science and Technology*, 10(1), 33–39. doi: 10.1080/21580103.2013.821958
- Luna-Flores, W., Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J. M., & Pinzón-López, L. L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343–353. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000400343&lng=es&tlng=es

Agradecimientos

Al CONACYT por el apoyo de la beca al primer autor para la realización de esta investigación.

Fin de la versión en español

- Martiñón-Martínez, R. J., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Guerrero, A., & López-Upton, J. (2011). Carbon isotopic composition in foliage of *Pinus pinceana* Gordon seedlings subjected to water and temperature stress. *Agrociencia*, 45(2), 245–258. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000200009&lng=es&tlng=en
- Martiñón-Martínez, R. J., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., Gómez-Guerrero, A., & Vaquera-Huerta, H. (2010). Respuesta de *Pinus pinceana* Gordon a estrés por sequía y altas temperaturas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(3), 239–248. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018773802010000300008&lng=es&tlng=pt
- May-Lara, C., Pérez-Gutiérrez, A., Ruiz-Sánchez, E., Ic-Caamal, A. E., & García-Ramírez, A. (2011). Efecto de niveles de humedad en el crecimiento y potencial hídrico de *Capsicum chinense* Jacq. y su relación con el desarrollo de *Bemisia tabaci* Genn. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(3), 1039–1045. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187004622011000300032&lng=es&tlng=es
- Morales-González, E., López-Upton, J., Vargas-Hernández, J. J., Ramírez-Herrera, C., & Gil-Muñoz, A. (2013). Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(2), 155–162. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802013000200008&lng=es&tlng=es
- Moreno, L. P. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179–191. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/img/revistas/agc/v27n2/v27n2a06.pdf>
- Nyland, R. D., Kenefic, L. S., Bohn, K. K., & Stout, S. (2016). *Silviculture: Concepts and applications*. Illinois, USA: Waveland Press, Inc.
- Otto, R., García-del-Rey, E., Méndez, J., & Fernández-Palacios, J. M. (2012). Effects of thinning on seed rain, regeneration and understory vegetation in a *Pinus canariensis* plantation (Tenerife, Canary Islands). *Forest Ecology and Management*, 280, 71–81. doi: 10.1016/j.foreco.2012.05.027
- Padilla-Ruíz, F. M. (2008). Factores limitantes y estrategias de establecimiento de plantas leñosas en ambientes semiáridos. Implicaciones para la restauración. *Ecosistemas*, 17(1), 155–159. Retrieved from <https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/viewFile/490/468>
- Pensado-Fernández, J. A., Sánchez-Velásquez, L. R., Pineda-López, M., & Díaz-Fleischer, F. (2014). Plantaciones forestales vs. regeneración natural *in situ*: el caso de los pinos y la rehabilitación en el Parque Nacional Cofre de Perote. *Botanical Sciences*, 92(4), 617–622. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-42982014000400013&lng=es&tlng=es
- R Development Core Team. (2015). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- Rebottaro, S. L., & Cabrelli, D. A. (2007). Regeneración natural de *Pinus elliottii* en claros silvícolas: dinámica poblacional durante siete años. *Madera y Bosques*, 17(1), 49–70. Retrieved from https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=617/61721586_004
- Romo-Guzmán, D., Valtierra-Pacheco, E., González-Guillén, M. J., Valdez-Lazalde, J. R., & Vivar-Miranda, R. (2016). Organización social ejidal y manejo del capital natural forestal maderable en Carbonero-Jacales, Huayacocotla, Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 85–100. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000200085&lng=es&tlng=es
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2006). Norma Oficial Mexicana NOM-152-SEMARNAT-2006. México: Diario Oficial de la Federación. Retrieved from <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3363/1/nom-152-semarnat-2006.pdf>
- Singh, B., & Singh, G. (2006). Effects of controlled irrigation on water potential, nitrogen uptake and biomass production in *Dalbergia sissoo* seedlings. *Environmental and Experimental Botany*, 55(1-2), 209–219. doi: 10.1016/j.envexpbot.2004.11.001
- South, D. B., & Zwolinski, J. B. (1997). Transplant stress index: a proposed method of quantifying planting check. *New Forests*, 13(1-3), 315–328. doi: 10.1023/A:1006546627342
- Statistical Analysis Systems Institute (2013). The SAS system for windows, release V. 9.4. Interfaz con ADABAS. Cary, NC, USA: Author. Retrieved from http://documentation.sas.com/?cdcId=pgmsascdc&cdcVersion=9.4_3.4&docsetId=pgmsashome&docsetTarget=home.htm&locale=es
- Vargas, P. E., & Vanegas, L. M. (2012). Evaluación complementaria del PROCOREF-CONAFOR Ejercicio Fiscal 2011. Retrieved from <http://www.cnf.gob.mx:8090/snif/portal/las-demas/estadisticas-delmedio-ambiente/22contenidos/evaluaciones/documentos-de-evaluaciones/53-evaluaciones-externascomplementarias>
- Wakamiya-Noborio, I., Heilman, J. L., Newton, R. J., & Messina, M. G. (1999). Diurnal changes in water conduction in loblolly pine (*Pinus taeda*) and Virginia pine (*P. virginiana*) during soil dehydration. *Tree Physiology*, 19(9), 575–581. doi: 10.1093/treephys/19.9.575
- Yang, X., Yan, D., & Liu, C. (2014). Natural regeneration of trees in three types of afforested stands in the Taihang Mountains, China. *PLoS ONE*, 9(9): e108744. doi: 10.1371/journal.pone.0108744