

Fertilization of two genetic groups of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. in a four-year progeny trial

Fertilización de dos grupos genéticos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. en un ensayo de progenies de cuatro años

Iván J. Velázquez-Castro¹; Arnulfo Aldrete^{1*}; Javier López-Upton¹; Miguel Á. López-López²; Jorge D. Etchevers-Barra²

¹Colegio de Postgraduados, Postgrado en Ciencias Forestales. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

²Colegio de Postgraduados, Postgrado en Edafología. km 36.5 carretera México-Texcoco. C. P. 56230. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Corresponding author: aaldrete@colpos.mx; tel.: +52 595 952 0200 ext. 1467.

Abstract

Introduction: Genetic improvement and nutritional management are used to increase productive capacity.

Objective: To analyze the effect of traditional and controlled-release fertilizers, as well as the way to define the doses (technically or empirically), on growth of 20 tree families of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Materials and methods: Four fertilization treatments were applied: 1) control; 2) "technical", based on foliar analysis; 3) controlled release (18-6-12 + 2CaO + 3.5 Mg + 2.1 Si + microelements); and 4) mixture of agricultural fertilizers in nutrient concentrations similar to the controlled-release treatment. Height, diameter, biomass index, number of whorls, leaf mass, and growth initiation and cessation were evaluated in a group of 10 superior and 10 inferior three-year old families in Chignahuapan, Puebla. Data were analyzed with the MIXED procedure of SAS.

Results and discussion: Trees showed no significant differences in growth, biomass production and growth initiation by fertilization effect, but showed significant differences by genetic quality ($P \leq 0.05$). The genotype*fertilization interaction was significant; after one year of controlled-release fertilizer application, inferior genotypes had the highest values of relative rates of biomass production, diameter at root collar and height.

Conclusions: Controlled-release fertilizers at appropriate doses and environmental conditions are a viable option to promote growth of young *P. patula* trees in the field.

Resumen

Introducción: El mejoramiento genético y el manejo nutrimental son utilizados para aumentar la capacidad productiva.

Objetivo: Analizar el efecto de fertilizantes tradicionales y de liberación controlada, así como la forma de definir las dosis (técnica o empíricamente), sobre el crecimiento de 20 familias de árboles de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Materiales y métodos: Se aplicaron cuatro tratamientos de fertilización: 1) control; 2) "técnico", basado en análisis foliares; 3) liberación controlada (18-6-12 + 2CaO + 3.5 Mg + 2.1 Si + microelementos) y 4) mezcla de fertilizantes agrícolas en concentraciones nutrimentales semejantes al tratamiento de liberación controlada. La altura, diámetro, índice de biomasa, número de verticilos, masa foliar e inicio y cese de crecimiento se evaluaron en un grupo de 10 familias superiores y otro de 10 familias inferiores de tres años en Chignahuapan, Puebla. Los datos se analizaron con el procedimiento MIXED de SAS.

Resultados y discusión: Los árboles no presentaron diferencias significativas en el crecimiento, producción de biomasa e inicio de crecimiento por efecto de la fertilización, pero sí por la calidad genética ($P \leq 0.05$). La interacción genotipo*fertilización fue significativa; después de un año de la aplicación de fertilizantes de liberación controlada, los genotipos inferiores presentaron los valores más altos de las tasas relativas de producción de biomasa, diámetro al cuello de la raíz y altura.

Conclusiones: Los fertilizantes de liberación controlada en dosis y condiciones ambientales adecuadas son una opción viable para promover el crecimiento de árboles jóvenes de *P. patula* en campo.

Keywords: controlled-release fertilizer; genotypes; forest nutrition; growth rate; foliar analysis.

Palabras clave: fertilizante de liberación controlada; genotipos; nutrición forestal; tasa de crecimiento; análisis foliar.

Introduction

Pinus is the most used genus to establish commercial forest plantations worldwide (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] & Colegio de Postgraduados [COLPOS], 2009). *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. var. *patula*, due to its high production capacity, it is important in countries of the southern hemisphere. (Dvorak et al., 2000); however, Mexico has a small planted area in spite of being the species' center of origin (Sáenz-Romero, Beaulieu, & Rehfeldt, 2011).

Water availability, light, climate, soil nutrients and individual genetics influence tree growth. The use of genetically superior trees with adequate nutrient management promotes performance of commercial forest plantations (Munsell & Fox, 2010) and it is a way to increase *P. patula* production in our country. Mexico reports advances in genetic improvement of *P. patula* by identifying more productive individuals or with higher wood quality (Bustillos-Aguirre, Vargas-Hernández, López-Upton, & Ramírez-Valverde, 2018; Valencia-Manzo & Vargas-Hernández, 2001), by establishing and studying the performance of new tree families selected in their natural range.

There are new technologies of improved effectiveness for plant nutrition such as controlled-release fertilizers, which are composed of traditional fertilizers coated with a polymer layer that, when wetted, are slowly released to the soil by diffusion, so that loss is minimized and time and energy required to be absorbed is reduced (Ali & Danafar, 2015; Chandra et al., 2019; Reyes-Millalón, Gerding, & Thiers-Espinoza, 2012). On the other hand, it has also been documented that inorganic fertilizers are effective in promoting *P. patula* growth (Lázaro-Dzul et al., 2012; Maliondo et al., 2005; Mavimbela, Crous, Morris, & Chirwa, 2018).

This experiment was designed to analyze the response of *P. patula* in productivity by combining genetic quality and nutritional condition in a progeny trial. The objective was to study the effect of traditional and controlled-release fertilizers, and of the doses defined technically or empirically, on the growth of 20 families of trees with different genetic quality, divided into a superior and an inferior group. The hypotheses were: 1) the effect of fertilizer doses defined by foliar analysis or empirical knowledge (based on previous experiments) is similar to each other; 2) the use of controlled release fertilizers and traditional agricultural fertilizers produces similar responses on tree growth; 3) growth initiation and cessation are influenced by fertilizer treatments; and 4) genotypic groups show similar responses to fertilizer application.

Introducción

El género *Pinus* es el más utilizado para establecer plantaciones forestales comerciales a nivel mundial (Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] & Colegio de Postgraduados [COLPOS], 2009). *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. var. *patula*, debido a su gran capacidad productiva, tiene gran importancia en países del hemisferio sur (Dvorak et al., 2000); sin embargo, México posee reducida superficie plantada a pesar de ser el centro de origen de la especie (Sáenz-Romero, Beaulieu, & Rehfeldt, 2011).

La disponibilidad de agua, la luz, el clima, los nutrimentos presentes en el suelo y la genética del individuo influyen en el crecimiento de los árboles. El uso de árboles genéticamente superiores con un manejo nutrimental adecuado promueve el rendimiento de las plantaciones forestales comerciales (Munsell & Fox, 2010) y es una forma de aumentar la productividad de *P. patula* en nuestro país. En México se reportan avances en el mejoramiento genético de *P. patula* a través de la identificación de individuos más productivos o con mayor calidad de madera (Bustillos-Aguirre, Vargas-Hernández, López-Upton, & Ramírez-Valverde, 2018; Valencia-Manzo & Vargas-Hernández, 2001), mediante el establecimiento y evaluación del desempeño de nuevas familias de árboles seleccionadas en su área de distribución natural.

Existen nuevas tecnologías de mayor efectividad para la nutrición de la planta como son los fertilizantes de liberación controlada, los cuales están compuestos por fertilizantes tradicionales recubiertos por una capa de polímero que, al humedecerse, se liberan lentamente al suelo por difusión, de forma que la pérdida se minimiza y se reduce el tiempo y energía requeridos para ser absorbidos (Ali & Danafar, 2015; Chandra et al., 2019; Reyes-Millalón, Gerding, & Thiers-Espinoza, 2012). Por otro lado, también se ha documentado que los fertilizantes inorgánicos son efectivos para promover el crecimiento de *P. patula* (Lázaro-Dzul et al., 2012; Maliondo et al., 2005; Mavimbela, Crous, Morris, & Chirwa, 2018).

El presente experimento se planteó para evaluar la respuesta de *P. patula* en productividad al conjuntar la calidad genética y la condición nutrimental en un ensayo de progenies. El objetivo fue analizar el efecto de los fertilizantes tradicionales y de liberación controlada, y de las dosis definidas técnica o empíricamente, sobre el crecimiento de 20 familias de árboles con calidad genética diferente, divididos en un grupo superior y otro inferior. Las hipótesis fueron: 1) el efecto de las dosis de fertilización definidas a través de análisis foliares o por conocimiento empírico

Materials and Methods

Study area

This experiment was conducted in a *P. patula* progeny trial established in September 2015 at the Agua Prieta property of the ejido Peñuelas Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla (19° 57' 43" N, 98° 06' 11" W, 2555 m elevation). The climate is C(E)(w), semi-cold subhumid with summer rainfall, mean annual temperature of 13.5 °C and precipitation between 750 and 1000 mm in the lower and upper parts, respectively (Pérez-Soto, Figueroa-Hernández, García-Núñez, & Godínez-Montoya, 2017). The soil is classified by INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013) as Durisol and Andosol.

The progeny trial is composed of 20 blocks with 100 half-sib families planted in plots of one tree per family, randomly placed in a 3 x 3 m real frame. Each individual was part of a family of trees with outstanding phenotypic characteristics, selected in the forest belonging to the ejido (20° 00' 11" N, 98° 07' 48" W, 2894 m elevation). When trees were 3 years old, they were measured and evaluated with an analysis of variance; block effect adjusted means (blocking the environmental factor) helped to determine genetic quality of each group of families (Salaya-Domínguez, López-Upton, & Vargas-Hernández, 2012). Ten families of superior and 10 of inferior genetic quality were selected for the experiment, according to height performance, to compare response to fertilization treatments applied.

Soil sampling and foliar analysis were performed as diagnostic in June 2018. Soil samples were obtained from the first 30 cm depth randomly in 12 blocks selected for the experiment (due to homogeneous drainage characteristics). Three composite samples were generated and analyzed according to NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Leaf samples from three genetically "superior" and three "inferior" individuals were found according to the methodology used by Wells and Allen (1985). Samples were oven-dried for 72 h at 70 °C, ground and analyzed. N concentrations were determined by the micro-Kjeldahl method and those of P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn and B by coupled plasma induction optical emission spectrometry (Varian ICP OES 725-ES; Mulgrave, Australia), using digests with a mixture of H₂SO₄:HClO₄ (2:1, v:v) (Alcántar-González & Sandoval-Villa, 1999).

Defining treatments

Treatment 1 corresponded to trees without fertilizer application, which were considered as controls.

(con base en experimentos previos) es similar entre sí; 2) el uso de fertilizantes de liberación controlada y fertilizantes agrícolas tradicionales produce respuestas similares en el crecimiento de los árboles; 3) el inicio y cese de crecimiento son influidos por los tratamientos de fertilización y 4) los grupos genotípicos muestran respuestas similares a la aplicación de fertilizantes.

Materiales y métodos

Área de estudio

El experimento se realizó en un ensayo de progenies de *P. patula* establecido en septiembre de 2015 en el predio Agua Prieta del ejido Peñuelas Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla (19° 57' 43" N, 98° 06' 11" O, 2555 m de elevación). El clima es C(E)(w), semifrío subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual de 13.5 °C y precipitación de entre 750 y 1000 mm en las partes bajas y altas, respectivamente (Pérez-Soto, Figueroa-Hernández, García-Núñez, & Godínez-Montoya, 2017). El suelo está clasificado por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013) como Durisol y Andosol.

El ensayo de progenies está compuesto de 20 bloques con 100 familias de medios hermanos plantados en parcelas de un solo árbol por familia, colocados aleatoriamente en marco real a 3 x 3 m. Cada individuo fue parte de una familia de árboles de características fenotípicas sobresalientes, seleccionados en el bosque perteneciente al ejido (20° 00' 11" N, 98° 07' 48" O, 2894 m de elevación). A los 3 años, los árboles fueron medidos y evaluados con un análisis de varianza; las medias ajustadas por efecto de los bloques (bloqueando el factor ambiental) ayudaron a determinar la calidad genética de cada grupo de familias (Salaya-Domínguez, López-Upton, & Vargas-Hernández, 2012). Se seleccionaron para el experimento 10 familias superiores y 10 de calidad genética inferior, según su desempeño en altura, para comparar su respuesta a los tratamientos de fertilización aplicados.

En junio de 2018 se realizó un muestreo de suelos y análisis foliar como diagnóstico. Las muestras de suelo se obtuvieron de los primeros 30 cm de profundidad de forma aleatoria en 12 bloques seleccionados para realizar el experimento (por sus características homogéneas en drenaje). Se generaron tres muestras compuestas y se analizaron acorde a la NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2002). Las muestras foliares de tres individuos "superiores" y tres "inferiores" genéticamente se obtuvieron conforme a la metodología utilizada por Wells y Allen (1985). Las muestras se secaron en estufa por 72 horas a 70 °C, se molieron y se analizaron. Las concentraciones de N

Treatment 2 or “technical” was defined by comparing the nutrient concentrations found in foliar analyses and critical concentrations reported by Sánchez-Parada, López-López, Gómez-Guerrero, and Pérez-Suárez (2018) for *P. patula*. To correct the deficiencies found, doses of 91 mL of Ca, 53 mL of Mn, 10 mL of Zn, and 5 mL of Fe were applied to the soil of each tree, using liquid fertilizers at concentrations of 10 %, 4 %, 8 %, and 8 % of those nutrients, respectively.

Treatment 3 was defined empirically based on other fertilization studies in related species and similar conditions (Reyes-Millalón et al., 2012; Štofko, 2010; Vázquez-Cisneros et al., 2018). The treatment involved the application of 20 g·tree⁻¹ of a controlled-release fertilizer (percentage % by weight: N-NO₃ = 5.80 %, N-NH₄ = 6.60 %, P₂O₅ = 6.00 %, K₂O = 12.00 %, CaO = 2.00 %, MgO = 3.50 %, Si = 2.10 %, S = 0.00 %, Fe = 0.40 %, Mn = 0.05 %, Cu = 0.04 %, Mo = 0.01 %, Zn = 0.06 % and B = 0.03 %, concentrations reported by the manufacturer), with a release time of six months depending on soil humidity and temperature.

Treatment 4 was established as a counterpart to the previous treatment, based on traditional agricultural fertilizers such as urea, phosphonitrate, magnesium sulfate, potassium nitrate and copper sulfate at doses of 4.32, 2.76, 2.46, 5.22 and 0.04 g·tree⁻¹, respectively; plus, phosphoric acid and liquid fertilizers of Ca at 10 %, Mn at 4 %, Zn at 8 % and Fe at 8 % at doses of 1.55, 0.87, 2.29, 0.13 and 0.24 mL·tree⁻¹, respectively, to match the concentrations of the controlled-release fertilizer (excluding Si, Mo and B).

Treatments were applied in September 2018, randomized at the block level, so each treatment had three replicates. Each replicate included 20 families represented by a single tree. Treatments 2 and 4 were applied in solution, distributing them manually in the drip zone of tree crowns. Treatment 3 was applied in the same area, in the four cardinal points, placing the granules in a small opening at surface soil level, which was then covered.

Measurement of variables

The initial measurement of diameter at root collar (DRC, cm), diameter at 1.3 m height (DBH, cm), total height (TH, cm) and number of whorls (VERT) was made in October 2018. Diameters were measured using a Lufkin® diametric tape and height with a 5 m high Apex® stadia. The final measurement was made in November 2019.

Phenology was assessed in Julian days by determining the onset (YEMA_IN) in February (7, 11, 18 and 25) and the cessation of height growth (YEMA_F) in October (1,

se determinaron por el método micro-Kjeldahl y las de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B por espectrometría de emisión óptica de inducción de plasma acoplado (Varian ICP OES 725-ES; Mulgrave, Australia), utilizando digestiones con una mezcla de H₂SO₄:HClO₄ (2:1, v:v) (Alcántar-González & Sandoval-Villa, 1999).

Definición de los tratamientos

El tratamiento 1 correspondió a los árboles sin aplicación de fertilizante, los cuales se consideraron como control. El tratamiento 2 o “técnico” se definió al comparar las concentraciones nutrimentales obtenidas en los análisis foliares y las concentraciones críticas reportadas por Sánchez-Parada, López-López, Gómez-Guerrero, y Pérez-Suárez (2018) para *P. patula*. Para corregir las deficiencias encontradas se aplicaron dosis de 91 mL de Ca, 53 mL de Mn, 10 mL de Zn y 5 mL de Fe al suelo de cada árbol, utilizando fertilizantes líquidos a concentraciones del 10 %, 4 %, 8 % y 8 % de dichos nutrimentos, respectivamente.

El tratamiento 3 se definió de forma empírica con base en otros trabajos de fertilización en especies relacionadas y condiciones similares (Reyes-Millalón et al., 2012; Štofko, 2010; Vázquez-Cisneros et al., 2018). El tratamiento consistió en la aplicación de 20 g·árbol⁻¹ de un fertilizante de liberación controlada (porcentaje % en peso: N-NO₃ = 5.80 %, N-NH₄ = 6.60 %, P₂O₅ = 6.00 %, K₂O = 12.00 %, CaO = 2.00 %, MgO = 3.50 %, Si = 2.10 %, S = 0.00 %, Fe = 0.40 %, Mn = 0.05 %, Cu = 0.04 %, Mo = 0.01 %, Zn = 0.06 % y B = 0.03 %, concentraciones reportadas por el fabricante), con un tiempo de liberación de seis meses en función de la humedad y la temperatura del suelo.

El tratamiento 4 se estableció como contraparte del anterior, a partir de fertilizantes agrícolas tradicionales como urea, fosfonitrato, sulfato de magnesio, nitrato de potasio y sulfato de cobre a dosis de 4.32, 2.76, 2.46, 5.22 y 0.04 g·árbol⁻¹, respectivamente; además, ácido fosfórico y fertilizantes líquidos de Ca al 10 %, Mn al 4 %, Zn al 8 % y Fe al 8 % a dosis de 1.55, 0.87, 2.29, 0.13 y 0.24 mL·árbol⁻¹, respectivamente, con el fin de asemejar las concentraciones del fertilizante de liberación controlada (excepto el Si, Mo y B).

Los tratamientos se aplicaron en septiembre de 2018, aleatorizados a nivel de bloque, de tal forma que cada tratamiento tuvo tres repeticiones. Cada repetición incluye 20 familias representadas por un solo árbol. Los tratamientos 2 y 4 se aplicaron en solución, distribuyéndolos de forma manual en la zona de goteo de las copas de los árboles. El tratamiento 3 se aplicó en la misma zona, en los cuatro puntos cardinales, colocando los gránulos en una pequeña apertura a nivel superficial del suelo que después fue cubierta.

11, 21 and 30) and November (14) 2019. Leaf sampling was done in November 2019 according to Wells and Allen (1985). The collected material was dried for three days in an oven at 70 °C and the mass of 100 needles (MASA_100, g) was obtained using a precision balance to hundredths of a gram (Chyo® JK-200, Chyo Balance Corp., Japan).

Other variables calculated were absolute growth rate (AGR) and relative production rate (RPR) for DRC, DBH, TH, VERT and biomass index [BI (dm³) = (DRC² * TH)/1000] (Álvarez, Rodríguez, & Suárez, 1999), in addition to MASA_100, YEMA_IN and YEMA_F, using the formulas of Hunt (1990):

$$AGR = \frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)}$$

$$RPR = \frac{\ln(W_2 / W_1)}{t_2 - t_1}$$

where,

AGR = average total increment for a defined interval

RPR = average relative production rate for a defined interval

W_(1,2) = current and previous period's increment for the variable evaluated (DRC, DBH, TH, IB and VERT)

t_(1,2) = initial and final measurement dates (one year).

Model and Statistical Analysis

The statistical model of completely randomized blocks allows identifying the effects of each factor and interaction between them, which corresponds to:

$$y_{ijkl} = \mu + T_l + B_{i(l)} + G_j + TG_{jl} + BG_{jl} + F_{k(j)} + TF_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

where,

y_{ijkl} = value of the individual of the k-th family, within the j-th genotypic group, in the i-th block nested in the l-th fertilization treatment

μ = population mean

T_l = fixed effect of the l-th fertilization treatment

B_{i(l)} = random effect of the i-th block nested in the l-th fertilization treatment ~NID(0, σ_b²)

G_j = fixed effect of the j-th genotypic group of trees

TG_{jl} = fixed effect of fertilization treatment and genotypic group interaction

BG_{jl} = random effect of interaction of replication and genotypic group ~NID(0, σ_{bg}²)

F_{k(j)} = random effect of the k-th family nested in the genotypic group ~NID(0, σ_{f(g)}²)

TF_{jkl} = random effect of treatment and family interaction within the genotypic group ~NID(0, σ_{tf}²)

ε_{ijkl} = error associated with these effects ~NID(0, σ_e²)

l = treatments 1, 2, 3 and 4

Medición de las variables

En octubre de 2018 se realizó la medición inicial del diámetro al cuello de la raíz (DCR, cm), diámetro a la altura de 1.3 m (DIAM, cm), altura total (ALT, cm) y número de verticilos (VERT). Los diámetros se midieron con cinta diamétrica marca Lufkin® y la altura con un estatal Apex® de 5 m de altura. La medición final se realizó en noviembre del 2019.

La fenología se evaluó en días julianos mediante la determinación del inicio (YEMA_IN) en febrero (7, 11, 18 y 25) y el cese del crecimiento en altura (YEMA_F) en octubre (1, 11, 21 y 30) y noviembre (14) de 2019. En noviembre de 2019 se hizo el muestreo foliar conforme a Wells y Allen (1985). El material recolectado se secó durante tres días en estufa a 70 °C y se obtuvo la masa de 100 acículas (MASA_100, g) con una balanza de precisión a centésimas de gramo (Chyo® JK-200, Chyo Balance Corp., Japón).

Otras variables calculadas fueron la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa relativa de producción (TRP) para el DCR, DIAM, ALT, VERT y el índice de biomasa [IB (dm³) = (DCR² * ALT)/1000] (Álvarez, Rodríguez, & Suárez, 1999), además de la MASA_100, YEMA_IN y YEMA_F, utilizando las fórmulas de Hunt (1990):

$$TCA = \frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)}$$

$$TRP = \frac{\ln(W_2 / W_1)}{t_2 - t_1}$$

donde,

TCA = incremento total promedio para un intervalo definido

TRP = tasa relativa de producción promedio para un intervalo definido

W_(1,2) = incremento corriente y del periodo anterior para la variable evaluada (DCR, DIAM, ALT, IB y VERT)

t_(1,2) = fechas de medición inicial y final (un año).

Modelo y análisis estadístico

El modelo estadístico de bloques completamente al azar permite identificar los efectos de cada factor y la interacción entre ellos, el cual corresponde a:

$$y_{ijkl} = \mu + T_l + B_{i(l)} + G_j + TG_{jl} + BG_{jl} + F_{k(j)} + TF_{jkl} + \varepsilon_{ijkl}$$

donde,

y_{ijkl} = valor observado del individuo de la k-ésima familia, dentro del j-ésimo grupo genotípico, en el i-ésimo bloque anidado en el tratamiento l-ésimo de fertilización

μ = media poblacional

T_l = efecto fijo del l-ésimo tratamiento de fertilización

i = blocks 1, 2 and 3 per treatment
 j = superior and inferior genotypes
 k = 10 families per genotypic group.

Data were analyzed with the MIXED procedure of the SAS 9.4® statistical program using the Restricted Maximum Likelihood (REML) method to determine the existence of significant differences (SAS Institute, 2015); when present, mean separation was done by direct pairwise comparison (PROC MIXED).

Results

Foliar and soil analysis

Tables 1 and 2 show that the physicochemical characteristics of the soil were adequate for the development of *P. patula*, although organic matter was low; the nutrients P-Bray, Cu, Mg and K were found to be deficient, according to NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Table 3 shows the results of the foliar analysis, the “technical” fertilization dose was formulated, based on the nutrient deficiencies detected.

According to Tables 4 and 5, the effects of fertilization treatments were not statistically different for the variables analyzed. However, genetic condition had a significant influence on absolute and relative growth rates of biomass index production ($P \leq 0.01$), as well as relative production rates of height and diameter at root collar ($P \leq 0.05$). On the other hand, absolute growth rate of diameter and growth initiation were significantly different with $P = 0.09$.

Fertilization treatments and genetic group had a significant interaction ($P \leq 0.05$) on relative production rates of root collar diameter and biomass index, the same occurred with the relative rate of height production, but at a lower significance ($P \leq 0.10$). For those variables, Figure 1 shows that interaction between treatment*genotypic group was statistically different ($P \leq 0.001$) for the case of the superior group-controlled release fertilization treatment in contrast to the same treatment of the inferior group that generated the highest values. Control and controlled-release treatments of the inferior genetic group also caused significantly different effect ($P \leq 0.10$) for the same variables (Figure 1); the controlled-release treatment generated a higher response on trees. In particular, the controlled-release treatment of the genetically superior group had a lower effect ($P \leq 0.10$) on relative growth rate in total height compared to “technical” and agricultural fertilization treatments (Figure 1). The rest of the variables evaluated for the effects considered in Table 4 were not statistically different.

On the other hand, growth initiation was faster for superior genotypes than for inferior genotypes for one

$B_{i(j)}$ = efecto aleatorio del i -ésimo bloque anidado en el l -ésimo tratamiento de fertilización $\sim NID(0, \sigma_b^2)$
 G_j = efecto fijo del j -ésimo grupo genotípico de árboles
 TG_{jl} = efecto fijo de la interacción tratamiento de fertilización y grupo genotípico
 RG_{jil} = efecto aleatorio de la interacción repetición y grupo genotípico $\sim NID(0, \sigma_{bg}^2)$
 $F_{k(j)}$ = efecto aleatorio de la k -ésima familia anidada en el grupo genotípico $\sim NID(0, \sigma_{fg}^2)$
 TF_{jkl} = efecto aleatorio de la interacción tratamiento y familia dentro del grupo genotípico $\sim NID(0, \sigma_{fj}^2)$
 ε_{jkl} = error asociado a dichos efectos $\sim NID(0, \sigma_e^2)$
 l = tratamientos 1, 2, 3 y 4
 i = bloques 1, 2 y 3 por tratamiento
 j = genotipos superiores e inferiores
 k = 10 familias por cada grupo genotípico.

Los datos se analizaron con el procedimiento MIXED del programa estadístico SAS 9.4® utilizando el método de Máxima Verosimilitud Restringida (REML, siglas en inglés), para determinar la existencia de diferencias significativas (SAS Institute, 2015); cuando las hubo, la separación de medias se hizo mediante comparación directa entre pares (PROC MIXED).

Resultados

Análisis foliar y de suelos

Los Cuadros 1 y 2 indican que las características físicoquímicas del suelo fueron adecuadas para el desarrollo de *P. patula*, aunque la materia orgánica fue baja; los nutrimentos P-Bray, Cu, Mg y K se encontraron en valores deficientes, según la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002). Asimismo, el Cuadro 3 muestra los resultados del análisis foliar, con base en el cual se formuló la dosis de fertilización “técnica”, a partir de las deficiencias nutrimentales detectadas.

De acuerdo con los Cuadros 4 y 5, los efectos de los tratamientos de fertilización no fueron estadísticamente diferentes para las variables evaluadas. No obstante, la condición genética sí influyó significativamente en las tasas de crecimiento absoluto y relativo de producción del índice de biomasa ($P \leq 0.01$), así como en las tasas relativas de producción de altura y diámetro al cuello de la raíz ($P \leq 0.05$). Por su parte, la tasa de crecimiento absoluto del diámetro y el inicio del crecimiento fueron significativamente diferentes con $P = 0.09$.

Los tratamientos de fertilización y el grupo genético tuvieron interacción significativa ($P \leq 0.05$) sobre las tasas relativas de producción del diámetro al cuello de la raíz y el índice de biomasa, de igual forma ocurrió con la tasa relativa de producción de la altura, pero a una menor significancia ($P \leq 0.10$). Para dichas variables, la Figura 1 ilustra que la interacción entre tratamiento*grupo genotípico fue estadísticamente

Table 1. Physicochemical characteristics of the soil where the *Pinus patula* progeny trial was established in the ejido Peñuelas, Pueblo Nuevo, Chignahuapan.

Cuadro 1. Características fisicoquímicas del suelo donde se estableció el ensayo de progenies de *Pinus patula* en el ejido Peñuelas, Pueblo Nuevo, Chignahuapan.

Physicochemical Characteristic/ Característica fisicoquímica	Value/ Valor
Texture/Textura	Clay/Arcillosa
Bulk density/Densidad aparente	1.19 g·cm ⁻³
Gravimetric moisture (in sieved samples)/ Humedad gravimétrica (en muestras tamizadas)	28.67 % at field capacity and 23.67 % at permanent wilting point/ 28.67 % a capacidad de campo y 23.67 % a punto de marchitez permanente
pH	5.45
Organic matter/Materia orgánica	2.45 %

Table 2. Soil nutrient concentrations of the *Pinus patula* progeny trial in the ejido of Peñuelas, Pueblo Nuevo, Chignahuapan.

Cuadro 2. Concentraciones nutrimentales del suelo del ensayo de progenies de *Pinus patula* en el ejido de Peñuelas, Pueblo Nuevo, Chignahuapan.

Nutrient/Nutrimento	Concentration/Concentración
N	0.09 %
Fe	21 ppm
Mn	35 ppm
Ca	8.12 cmol·kg ⁻¹
Zn	0.72 ppm
P-Bray	14.5 ppm
Cu	0.90 ppm
Mg	1.03 cmol·kg ⁻¹
K	0.26 cmol·kg ⁻¹

Table 3. *Pinus patula* foliar analysis and diagnosis based on critical concentrations reported by Sánchez-Parada et al. (2018).
Cuadro 3. Análisis foliar de *Pinus patula* y diagnóstico con base en las concentraciones críticas reportadas por Sánchez-Parada et al. (2018).

Composite sample/ Muestra compuesta	N (%)	P	K	Ca	Mg	Fe (ppm)	Cu	Zn	Mn	B
Inferior genotypes/Genotipos inferiores										
1	1.33	2 003.70	9 479.75	1 077.71	1 649.17	75.83	3.31	16.45	132.39	26.09
2	2.24	2 096.87	8 873.34	1 036.91	1 150.24	95.55	4.76	19.44	107.27	22.96
3	1.89	2 389.35	10 132.00	1 202.64	1 695.23	110.77	3.97	18.15	149.90	25.86
Mean ± standard error (A)/ Media ± error estándar (A)	1.82 (±0.27)	2 163.31 (±116.18)	9 495.03 (±363.42)	1 105.75 (±49.85)	1 498.21 (±174.49)	94.05 (±10.11)	4.02 (±0.42)	18.01 (±0.86)	129.85 (±12.37)	24.97 (±1.01)
Critical concentrations (B)/ Concentraciones críticas (B)	1.49	1 300.00	6 300.00	3 300.00	1 400.00	118.69	2.14	30.60	187.47	11.25
Diagnosis (A-B)/ Diagnóstico (A-B)	0.33	863.31	3 195.03	-2 194.25	98.21	-24.64	1.88	-12.59	-57.62	13.72
Superior genotypes/Genotipos superiores										
1	1.68	2 123.03	7 097.34	1 224.90	1 245.67	92.321	2.92	22.85	111.76	23.10
2	1.82	2 231.16	9 782.76	1 049.83	1 418.61	82.418	4.28	19.05	82.73	25.54
3	1.54	1 733.35	8 261.08	895.34	1 359.88	64.121	2.77	10.62	86.92	21.49
Mean ± standard error (A)/ Media ± error estándar (A)	1.68 (±0.48)	2 029.18 (±439.04)	8 380.39 (±1 912.5)	1 056.69 (±1 111.69)	1 341.39 (±414.33)	79.62 (±37.45)	3.32 (±0.70)	17.51 (±11.23)	93.81 (±52.3)	23.38 (±3.6)
Critical concentrations (B)/ Concentraciones críticas (B)	1.49	1 300.00	6 300.00	3 300.00	1 400.00	118.69	2.14	30.60	187.47	11.25
Diagnosis (A-B)/ Diagnóstico (A-B)	0.19	729.18	2 080.39	-2 243.31	-58.61	-39.07	1.18	-13.10	-93.67	12.13

day ($P \leq 0.10$) (Tables 4 and 5). Growth cessation could only be determined for 61 trees, which had an average growth period of 270 days, while 179 continued to grow, presumably due to the occurrence of the last rains in the month of November.

Table 6 shows that, at the family level within genotypic groups (F_{kij}), absolute and relative growth rates for the number of whorls had significant differences ($P \leq 0.01$). This was also the case for the mass of 100 needles, but at a lower significance ($P \leq 0.10$). The interaction effect between fertilization and families (TF_{jkl}) was significant in the case of absolute growth rate of diameter at root collar ($P = 0.06$) and relative production rate of number of whorls ($P = 0.07$).

Discussion

Foliar nutrient concentrations were found within the range of normal values found by Louw and Scholes (2003) for samples taken in the growing season, except for Ca, Mn and Fe which were found in the lower limits, which is consistent with the comparison of critical concentrations reported by Sánchez-Parada et al. (2018).

diferente ($P \leq 0.001$) para el caso del tratamiento de fertilización de liberación controlada del grupo superior en contraste al mismo tratamiento del grupo inferior que generó los valores más altos. Los tratamientos control y de liberación controlada del grupo genético inferior también causaron efecto significativamente diferente ($P \leq 0.10$) para las mismas variables (Figura 1), siendo el tratamiento de liberación controlada el que generó una mayor respuesta sobre los árboles. De manera particular, el tratamiento de liberación controlada del grupo genéticamente superior tuvo efecto menor ($P \leq 0.10$) en la tasa de crecimiento relativo en altura total en comparación con los tratamientos de fertilización “técnica” y agrícola (Figura 1). El resto de las variables evaluadas para los efectos considerados en el Cuadro 4 no fueron estadísticamente diferentes.

Por otra parte, el inicio del crecimiento fue más rápido en los genotipos superiores que en los inferiores por un día ($P \leq 0.10$) (Cuadros 4 y 5). El cese de crecimiento solo se pudo determinar para 61 árboles, los cuales tuvieron un periodo de crecimiento promedio de 270 días, mientras que 179 continuaban creciendo,

Table 4. Statistical significance of the evaluated effects derived from the analysis of variance in the *Pinus patula* progeny trial.

Cuadro 4. Significancias estadísticas de los efectos evaluados derivados del análisis de varianza en el ensayo de progenies de *Pinus patula*.

Effect/Efecto	RPR BI/ TRP IB	RPR DRC/ TRP DCR	RPR TH/ TRP ALT	AGR BI/ TCA IB	AGR DBH/ TCA DIAM	YEMA_IN
	Pr > F					
Fertilization (F)/ Fertilización (F)	0.74	0.80	0.57	0.83	0.87	0.94
Genotype group (G)/ Grupo genotípico (G)	0.01	0.03	0.02	0.01	0.09	0.09
Interaction F*G/ Interacción F*G	0.02	0.05	0.10	0.54	0.51	0.92

AGR: absolute growth rate, RPR: relative production rate, BI: biomass index, DRC: diameter at root collar, TH: total height, DBH: diameter at breast height, YEMA_IN: initiation of growth.

TCA: tasa de crecimiento absoluto, TRP: tasa relativa de producción, IB: índice de biomasa, DCR: diámetro al cuello de la raíz, ALT: altura total, DIAM: diámetro a la altura de pecho, YEMA_IN: inicio del crecimiento.

Table 5. Absolute growth rate (AGR) and relative growth rate (RPR), 100 needle mass (g) and growth initiation and cessation of *Pinus patula* per treatment and genotypic group.
 Cuadro 5. Tasas de crecimiento absoluto (TCA) y relativo de producción (TRP), masa de 100 acículas (g) e inicio y cese de crecimiento de *Pinus patula* por tratamiento y grupo genotípico.

Factor	Height (cm·year ⁻¹)/ Altura (cm·año ⁻¹)		Diameter at root collar (cm·year ⁻¹)/ Diámetro al cuello de la raíz (cm·año ⁻¹)		Biomass index (dm ³ ·year ⁻¹)/ Índice de biomasa (dm ³ ·año ⁻¹)		Diameter (cm·year ⁻¹)/ Diámetro (cm·año ⁻¹)		Whorls (units·year ⁻¹)/ Verticilos (unidades·año ⁻¹)		Mass of 100 needles (g)/ Masa de 100 acículas (g)		
	AGR/ TCA	RPR/ TRP	AGR/ TCA	RPR/ TRP	AGR/ TCA	RPR/ TRP	AGR/ TCA	RPR/ TRP	AGR/ TCA	RPR/ TRP	Yema_in (Julian days)/ Yema_in (días julianos)	Yema_f (Julian days)/ Yema_f (días julianos)	
Treatment/Tratamiento													
Treatment 1/ Tratamiento 1	155 ± 9.18 a	0.48 ± 0.02 a	3.8 ± 0.24 a	0.45 ± 0.02 a	38.61 ± 6.27 a	1.38 ± 0.06 a	2.82 ± 0.28 a	0.72 ± 0.07 a	4.7 ± 0.36 a	0.48 ± 0.02 a	2.77 ± 0.09 a	43.0 ± 0.85 a	312.6 ± 2.65 a
Treatment 2/ Tratamiento 2	154 ± 9.18 a	0.51 ± 0.02 a	3.9 ± 0.24 a	0.48 ± 0.02 a	36.45 ± 6.27 a	1.47 ± 0.06 a	2.90 ± 0.28 a	0.86 ± 0.07 a	4.2 ± 0.36 a	0.46 ± 0.02 a	2.87 ± 0.09 a	42.4 ± 0.85 a	316.9 ± 2.90 a
Treatment 3/ Tratamiento 3	157 ± 9.18 a	0.49 ± 0.02 a	4.2 ± 0.24 a	0.48 ± 0.02 a	43.77 ± 6.27 a	1.44 ± 0.06 a	3.06 ± 0.28 a	0.71 ± 0.07 a	4.2 ± 0.36 a	0.46 ± 0.02 a	2.91 ± 0.09 a	42.6 ± 0.84 a	308.6 ± 3.26 a
Treatment 4/ Tratamiento 4	157 ± 9.18 a	0.51 ± 0.02 a	4.0 ± 0.24 a	0.47 ± 0.02 a	36.83 ± 6.27 a	1.45 ± 0.06 a	3.12 ± 0.28 a	0.84 ± 0.07 a	4.4 ± 0.36 a	0.47 ± 0.02 a	2.80 ± 0.09 a	42.4 ± 0.84 a	313.0 ± 2.93 a
Genotype group / Grupo genotípico													
Inferior	154 ± 5.24 A	0.52 ± 0.01 B	3.9 ± 0.14 A	0.49 ± 0.01 B	34.96 ± 3.37 B	1.49 ± 0.04 B	2.86 ± 0.15 B	0.80 ± 0.04 A	4.2 ± 0.25 A	0.47 ± 0.02 A	2.80 ± 0.08 A	43.2 ± 0.53 B	312.1 ± 1.72 A
Superior	158 ± 5.24 A	0.47 ± 0.01 A	4.1 ± 0.14 A	0.45 ± 0.01 A	42.86 ± 3.37 A	1.38 ± 0.04 A	3.09 ± 0.15 A	0.76 ± 0.04 A	4.6 ± 0.25 A	0.47 ± 0.02 A	2.87 ± 0.08 A	42.0 ± 0.53 A	313.4 ± 1.78 A

Treatments: 1 = control, 2 = "technical" fertilization based on foliar analysis, 3 = controlled-release fertilization, 4 = traditional agricultural fertilization. ± standard deviation of the mean. Mean values followed by different letters are different from each other ($P \leq 0.10$) by direct comparisons between pairs of means (PROC MIXED).

Tratamientos: 1 = control, 2 = fertilización "técnica" con base en análisis foliares, 3 = fertilización de liberación controlada, 4 = fertilización agrícola tradicional. ± desviación estándar de la media. Valores promedio seguidos de letras distintas son diferentes entre sí ($P \leq 0.10$) por comparaciones directas entre pares de medias (PROC MIXED).

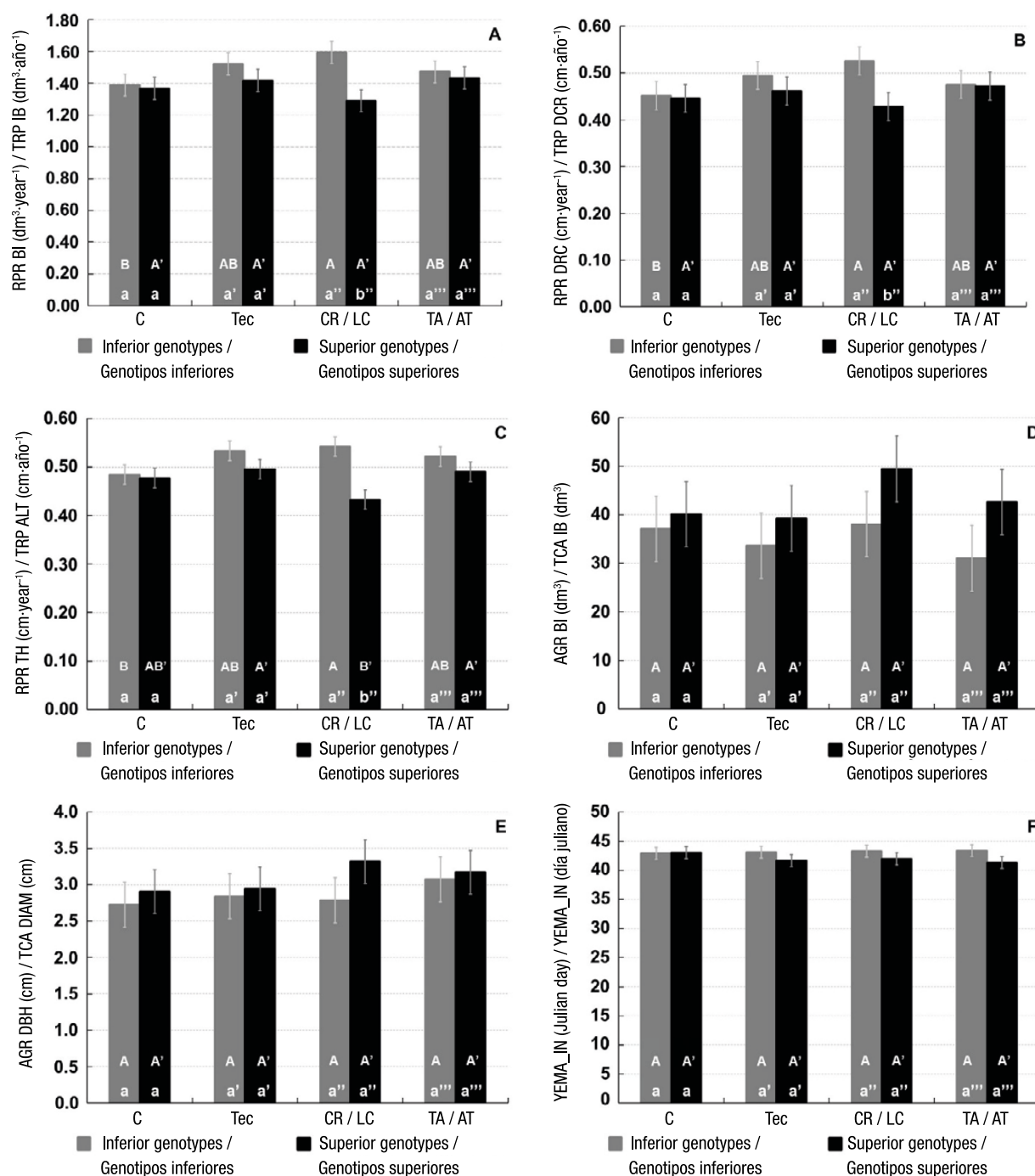


Figure 1. Relative production growth rates (RGR) of biomass index (BI), diameter at root collar (DRC) and total height (TH) absolute growth rates of BI and diameter (DBH), and growth initiation date (YEMA_IN) in control treatment (C), technical based on foliar analysis (Tec), controlled-release fertilizer (CR) and traditional agricultural fertilizer (TA) per genotypic group. Means with different capital letter (comparison between fertilizer treatments within each genotype) or lower-case letter (comparison between the two genotypes within each fertilizer treatment) are different from each other ($P \leq 0.10$) by direct comparisons between pairs of means (PROC MIXED).

Figura 1. Tasas de crecimiento relativo de producción (TPR) del índice de biomasa (IB), diámetro al cuello de la raíz (DCR) y altura total (ALT), tasas de crecimiento absoluto del IB y el diámetro (DIAM), y fecha de inicio del crecimiento (YEMA_IN) en el tratamiento control (C), técnico con base en análisis foliares (Tec), fertilizante de liberación controlada (LC) y fertilizantes agrícolas tradicionales (AT) por grupo genotípico. Medias con distinta letra mayúscula (comparación entre tratamientos de fertilización en cada genotipo) o letra minúscula (comparación entre los dos genotipos dentro de cada tratamiento de fertilización) son diferentes entre sí ($P \leq 0.10$) por comparaciones directas entre pares de medias (PROC MIXED).

Table 6. Statistical significances of effects evaluated at the family level, from the analysis of variance in the *Pinus patula* progeny trial.**Cuadro 6. Significancias estadísticas de los efectos evaluados a nivel de familia, derivados del análisis de varianza en el ensayo de progenies de *Pinus patula*.**

Effect/Efecto	AGR VERT/ TCA VERT	RPR VERT/ TRP VERT	MASA_100	AGR DRC/ TCA DCR
	Pr > F			
Fertilization (F)/Fertilización (F)	0.7045	0.7823	0.6779	0.7099
Genotype group (G)/ Grupo genotípico (G)	0.0494	0.9414	0.4504	0.1989
F*G interaction/Interacción F*G	0.9077	0.8883	0.4450	0.6600
Family (Group)/Familia (Grupo)	<0.001	0.0050	0.0987	0.9403
Fertilization*Family (Group)/ Fertilización*Familia (Grupo)	0.1848	0.0642	0.9969	0.0553

AGR: Absolute growth rate, RPR: Relative production rate, VERT: number of whorls, MASA_100: mass of 100 needles, DRC: diameter at root collar.

TCA: tasa de crecimiento absoluto, TRP: tasa relativa de producción, VERT: número de verticilos, MASA_100: masa de 100 acículas, DCR: diámetro al cuello de la raíz.

Growth results were higher than those found by Gómez-Cárdenas, Vargas-Hernández, Jasso-Mata, Velázquez-Martínez, and Rodríguez-Franco (1998), who reported height growths of 108 and 66 cm in 4-year-old *P. patula* during two successive 300-day growing seasons in Texcoco, Mexico. However, the results were lower than those reported by Salazar-García et al. (1999) with height increments between 174 ± 43 cm and 203 ± 43 cm in one year for two provenances from Zacatlán, an area close to the present study, in 1.5-year-old unfertilized plantations of the same species. This situation also occurred in the case of the number of growth cycles (5.51 ± 1.50 and 5.77 ± 1.32) compared to those found in this experiment (AGR_VERT).

The few observed differences of the families evaluated may be related to the fact that the trial is in a relatively different water stress level site than where their parents grow; even though the collection area and the trial are 5 km apart, mean annual precipitation is 795 vs. 724 mm and the aridity index is 0.064 vs. 0.075, respectively (Virginia Tech & USDA Forest Service, 2020). The lower water availability may have influenced tree growth because height and diameter depend on water availability in the previous and current year (Kozłowski, 1964); it also affects the efficiency in the use of other resources (Binkley, Stape, & Ryan, 2004), as indicated by Vásquez-García et al. (2015), who found no differences with the application of traditional agricultural fertilizers in *P. patula* when light was the limiting resource.

Genetic adaptations to provenance can also limit growth, even when environmental conditions are

presumiblemente por la ocurrencia de las últimas lluvias en el mes de noviembre.

El Cuadro 6 indica que, a nivel de familia dentro de los grupos genotípicos (F_{kij}), las tasas de crecimiento absoluto y relativo para el número de verticilos presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.01$). Esto también sucedió para el caso de la masa de 100 acículas, pero a una significancia menor ($P \leq 0.10$). Por su parte, el efecto de la interacción entre la fertilización y las familias (TF_{jki}) fue significativa en el caso de la tasa de crecimiento absoluto del diámetro al cuello de la raíz ($P = 0.06$) y la tasa relativa de producción del número de verticilos ($P = 0.07$).

Discusión

Las concentraciones nutrimentales foliares se encontraron dentro del rango de valores normales obtenidos por Louw y Scholes (2003) para muestras tomadas en la época de crecimiento, con excepción del Ca, Mn y Fe que se encontraron en los límites inferiores, lo cual es consistente con la comparación de las concentraciones críticas reportadas por Sánchez-Parada et al. (2018).

Los resultados de crecimiento fueron mayores que los obtenidos por Gómez-Cárdenas, Vargas-Hernández, Jasso-Mata, Velázquez-Martínez, y Rodríguez-Franco (1998), quienes reportaron crecimientos en altura de 108 y 66 cm en *P. patula* de 4 años durante dos temporadas sucesivas de crecimiento de 300 días en Texcoco, México. No obstante, los resultados fueron menores que los señalados por Salazar-García et al.

favorable. For example, in a provenance experiment in Huauchinango, a temperate and humid site, and the provenance of Tlaxco, Tlaxcala, a cold and dry site, *P. patula* grew poorly (Salazar-García et al., 1999). Moreover, these authors found that elevation of provenance was negatively correlated with the number of growth cycles ($r = -0.80$) and the increase in height ($r = -0.82$); that is, the origins of higher altitude had lower growth in height and fewer cycles generated per year.

The absence of response to fertilization in this experiment contrasts with that reported by Reyes-Millalón et al. (2012), who demonstrated the efficiency of controlled-release fertilizers on growth of *Pinus radiata* D. Don with doses of 10 to 20 g in seedlings, 46 months after establishment. The results also contrast with the study of Vázquez-Cisneros et al. (2018), who report that some treatments with traditional agricultural fertilizers generated the same response as slow-release fertilizers in *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii*, one year after applying 7 to 14 g of fertilizers during the experiment. Štofko (2010) had significant results in 3-year-old plantations of *Picea abies* (L.) H. Karst, applying controlled-release fertilizer (50 g), and in *Larix decidua* Mill. he recorded differences in height from the first year. Previous studies suggests that both fertilizer dose and plantation age may have been a limiting factor in the response to fertilization in this study.

For the present case, growth initiation date was slightly advanced by fertilization treatments, as reported by Fløistad (2002) and Pan, Jacobs, and Li (2017) in saplings of *P. abies* and *Pinus tabuliformis* Carrière, respectively, although the effect was not statistically significant. However, the genetic effect was significant, which is consistent with the fact that phenology in *Pinus* possesses heritable genetic control for both bud break, bud dormancy, and cold requirements for induction (temperature and photoperiod) (Cooke, Eriksson, & Junttila, 2012).

Results obtained by Salaya-Domínguez et al. (2012) and Bustillos-Aguirre et al. (2018) suggest that *P. patula* has low to moderate genetic control and genotype*environment (G*E) interaction at early ages. The G*E interaction can be affected by fertilization, particularly in N and P use (Li, McKeand, & Allen, 1991; Zhang, Zhou, & Yang, 2013), which occurred in this experiment as a joint response of all families within the genotypic group and not because of the existence of particularly efficient families in the use of applied nutrients. This contrasts with that reported by Zas, Pichel, Martíns, and Fernández-López (2006) in *P. radiata*, who reported positive effects on height with the use of traditional agricultural fertilizers and found that some families had greater efficiency in the

(1999) con incrementos en altura entre 174 ± 43 cm y 203 ± 43 cm en un año para dos procedencias de Zacatlán, área cercana a la del presente trabajo, en plantaciones de 1.5 años sin fertilizar de la misma especie. Tal situación también sucedió en el caso del número de ciclos de crecimiento (5.51 ± 1.50 y 5.77 ± 1.32) en comparación con los encontrados en este experimento (TCA_VERT).

Las exiguas diferencias observadas en las familias evaluadas pueden deberse a que el ensayo está en un sitio con nivel de estrés hídrico relativamente distinto al lugar de donde crecen sus progenitores; a pesar de que el área de recolecta y el ensayo están a 5 km de distancia, la precipitación media anual es 795 vs. 724 mm y el índice de aridez es 0.064 vs. 0.075, respectivamente (Virginia Tech & USDA Forest Service, 2020). La menor disponibilidad de agua debe haber influido en el crecimiento de los árboles, ya que la altura y el diámetro dependen de la disponibilidad de agua del año anterior y el corriente (Kozłowski, 1964); asimismo, afecta la eficiencia en el uso de otros recursos (Binkley, Stape, & Ryan, 2004), tal como lo indican Vázquez-García et al. (2015), quienes no encontraron diferencias con la aplicación de fertilizantes agrícolas tradicionales en *P. patula* cuando la luz era el recurso limitante.

Las adaptaciones genéticas al lugar de procedencia también pueden limitar el crecimiento, aun cuando las condiciones ambientales sean propicias. Por ejemplo, en un experimento de procedencias en Huauchinango, lugar templado y húmedo, y la procedencia de Tlaxco, Tlaxcala, lugar frío y seco, *P. patula* no creció adecuadamente (Salazar-García et al., 1999). Adicionalmente, estos autores encontraron que la elevación de la procedencia se correlacionaba negativamente con el número de ciclos de crecimiento ($r = -0.80$) y el incremento en altura ($r = -0.82$); es decir, los orígenes de mayor altitud presentaron menor crecimiento en altura y menos ciclos generados por año.

La ausencia de respuesta a la fertilización en este experimento contrasta con lo reportado por Reyes-Millalón et al. (2012), quienes demostraron la eficiencia de los fertilizantes de liberación controlada en el crecimiento de *Pinus radiata* D. Don con dosis de 10 a 20 g en plántulas de 46 meses después de establecidas. Los resultados también contrastan con el estudio de Vázquez-Cisneros et al. (2018), quienes afirman que algunos tratamientos con fertilizantes agrícolas tradicionales generaron la misma respuesta que los de lenta liberación en *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii*, un año después de aplicar 7 a 14 g de fertilizantes en el establecimiento. Štofko (2010) obtuvo resultados significativos en plantaciones de *Picea abies* (L.) H. Karst de 3 años, durante los cuales

use of nutrients; however, when analyzed as a whole, the family*fertilization interaction was not significant, apparently due to differences in fertility of each site, prior to fertilization. Martins, Sampedro, Moreira, and Zas (2009), in a similar experiment with *Pinus pinaster* Aiton, found significant differences for height in the five years they evaluated the plantations. These authors determined the efficiency of the use of foliar analysis to correct nutrient deficiencies in two of the three sites evaluated and demonstrated the existence of genotype interactions with nutrient availability.

Conclusions

Fertilization formulas for three-year-old *Pinus patula* trees, including the one proposed from the foliar analysis, showed no significant responses in growth and biomass production in the year of evaluation. However, trees show significant differences because of the effect of the genetic group and the genotype*fertilization interaction, where superior and inferior genotypes showed higher values of absolute growth and relative production rate, respectively. The controlled-release fertilizer caused the highest growth in the superior genotypes in contrast to the traditional fertilizers that were not statistically different from the control. The use of controlled-release fertilizers seems to be a viable option to promote growth of young plantations in the field, if applied in adequate doses and formulas and if adequate environmental conditions exist to optimize its use.

Acknowledgments

The authors would like to thank CONACYT for the grant awarded to the first author to carry out this study and the ejido of Peñuelas in Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla, for the facilities provided.

End of English version

References / Referencias

- Alcántar-González, G., & Sandoval-Villa, M. (1999). *Manual de análisis químico de tejido vegetal: guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación*. Chapingo, México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Universidad Autónoma Chapingo.
- Ali, S., & Danafar, F. (2015). Controlled-release fertilizers: Advances and challenges. *Life Science Journal*, 12(11), 33–45. Retrieved from http://www.lifesciencesite.com/ljsj/life121115/005_17565life121115_33_45.pdf
- Álvarez, J., Rodríguez, J., & Suárez, D. (1999). Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, a través de un método racional de fertilización. *Bosque*, 20(1), 23–36. Retrieved from <http://revistas.uach.cl/pdf/bosque/v20n1/art03.pdf>

aplicó fertilizante de liberación controlada (50 g), y en *Larix decidua* Mill. registró diferencias en altura desde el primer año. Los trabajos anteriores sugieren que tanto las dosis de fertilizante como la edad de la plantación pudieron ser un factor limitante de la respuesta a la fertilización en este estudio.

Para el presente caso, fecha de inicio del crecimiento se adelantó ligeramente a causa de los tratamientos de fertilización, tal como reportaron Fløistad (2002) y Pan, Jacobs, y Li (2017) en brinzales de *P. abies* y *Pinus tabuliformis* Carrière, respectivamente, aunque el efecto no fue estadísticamente significativo. No obstante, el efecto genético sí fue significativo, lo que es consistente con el hecho de que la fenología en *Pinus* posee un control genético heredable tanto para el rompimiento, la dormancia de las yemas y los requerimientos de frío para su inducción (temperatura y fotoperiodo) (Cooke, Eriksson, & Junntila, 2012).

Los resultados obtenidos por Salaya-Domínguez et al. (2012) y Bustillos-Aguirre et al. (2018) sugieren que *P. patula* tiene control genético bajo a moderado y con interacción genotipo*ambiente (G*A) en edades tempranas. La interacción G*A puede verse afectada por la fertilización, particularmente en el uso del N y el P (Li, McKeand, & Allen, 1991; Zhang, Zhou, & Yang, 2013) lo que ocurrió en este experimento como una respuesta conjunta de todas las familias dentro del grupo genotípico y no por la existencia de familias particularmente eficientes en el uso de los nutrimentos aplicados. Esto contrasta con lo reportado por Zas, Pichel, Martíns, y Fernández-López (2006) en *P. radiata*, quienes reportaron efectos positivos en altura ante el uso de fertilizantes agrícolas tradicionales, y encontraron que algunas familias tenían mayor eficiencia en el uso de los nutrimentos; no obstante, al analizarlos en su conjunto, la interacción familia*fertilización no fue significativa, presumiblemente por diferencias en fertilidad de cada sitio, previo a la fertilización. Martins, Sampedro, Moreira, y Zas (2009), en un experimento similar con *Pinus pinaster* Aiton, encontraron diferencias significativas para la altura en los cinco años que evaluaron las plantaciones. Dichos autores determinaron la eficiencia del uso de los análisis foliares para corregir las deficiencias nutrimentales en dos de los tres sitios evaluados, y demostraron también la existencia de interacciones del genotipo con la disponibilidad nutrimental.

Conclusiones

Las fórmulas de fertilización en árboles de *Pinus patula* de tres años, incluida la propuesta a partir del análisis foliar, no generaron respuestas significativas en el crecimiento y producción de biomasa al año de evaluación. No obstante, los árboles sí presentaron diferencias significativas por efecto del grupo

- Binkley, D., Stape, J. L., & Ryan, M. G. (2004). Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*, 193(1–2), 5–16. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.019
- Bustillos-Aguirre, C. V., Vargas-Hernández, J. J., López-Upton, J., & Ramírez-Valverde, G. (2018). Repetibilidad de parámetros genéticos de las características de ramificación en progenies de *Pinus patula*. *Madera y Bosques*, 24(1), 1–10. doi: 10.21829/myb.2018.2411131
- Chandra, M. S., Lal, M., Naresh, R. K., Yadav, S., Kumar, R., Kumar, R., ... Lavanya, N. (2019). Role of polymer coated fertilizers (PCFS) an advance technology for improving nutrient use efficiency and crop productivity: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 7(6), 2667–2679. Retrieved from <http://www.chemijournal.com/archives/2019/vol7issue6/PartAR/7-6-475-496.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), & Colegio de Postgraduados (COLPOS). (2009). *Situación actual y perspectivas de las plantaciones forestales comerciales en México*. Zapopan, México: Comisión Nacional Forestal-Colegio de Postgraduados.
- Cooke, J. E. K., Eriksson, M. E., & Junttila, O. (2012). The dynamic nature of bud dormancy in trees: Environmental control and molecular mechanisms. *Plant, Cell and Environment*, 35(10), 1707–1728. doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02552.x
- Dvorak, W. S., Hodge, G. R., Kietzka, J. E., Malan, F., Osorio, L. F., & Stanger, T. K. (2000). *Pinus patula*. In CAMCORE Cooperative (Ed.), *Conservation & testing of tropical & subtropical forest tree species by the CAMCORE cooperative* (pp. 148–173). Raleigh, USA: Carolina State University.
- Fløistad, I. S. (2002). Effects of excessive nutrient supply and short day treatment on autumn frost hardiness and time of bud break in *Picea abies* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(4), 295–303. doi: 10.1080/02827580260138053
- Gómez-Cárdenas, M., Vargas-Hernández, J. J., Jasso-Mata, J., Velázquez-Martínez, A., & Rodríguez-Franco, C. (1998). Patrón de crecimiento anual del brote terminal en árboles jóvenes de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 32(4), 357–363. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266391132>
- Hunt, R. (1990). *Basic growth analysis*. London, UK: Unwin Hyman.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). Conjunto de datos perfiles de suelos. Escala 1:250 000 serie II (continuo nacional). Retrieved May 23, 2020 from <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>
- Kozlowski, T. T. (1964). Shoot growth in woody plants. *The Botanical Review*, 30(3), 335–392. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/4353695>
- Lázaro-Dzul, M. O., Velázquez-Mendoza, J., Vargas-Hernández, J. J., Gómez-Guerrero, A., Álvarez-Sánchez, M. E., & López-López, M. A. (2012). Fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en un latizal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Chapingo* genético y por la interacción genotipo*fertilización, donde los genotipos superiores e inferiores presentaron valores mayores de crecimiento absoluto y tasa relativa de producción, respectivamente. El fertilizante de liberación controlada provocó el mayor crecimiento en los genotipos superiores en contraste con los fertilizantes tradicionales que no fueron estadísticamente diferentes al control. El uso de fertilizantes de liberación controlada parece ser una opción viable para promover el crecimiento de plantaciones jóvenes en campo, siempre que se aplique en dosis y fórmulas adecuadas y existan las condiciones ambientales que permitan su mejor utilización.
- ### Agradecimientos
- Al CONACYT por la beca otorgada al primer autor para la realización de este estudio y al ejido de Peñuelas en Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla, por las facilidades otorgadas.
- ### Fin de la versión en español
-
- Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 33–42. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.01.001
- Li, B., McKeand, S. E., & Allen, H. L. (1991). Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *Forest Science*, 37(2), 613–626. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/233523956%0AGenetic>
- Louw, J. R., & Scholes, M. C. (2003). Foliar nutrient levels as indicators of site quality for *Pinus patula* in the Mpumalanga escarpment area. *The Southern African Forestry Journal*, 197(1), 21–30. doi: 10.1080/20702620.2003.10431718
- Maliondo, S. M. S., Mtui, E. B., Chamshama, S. A. O., Nsolomo, V. R., Msanya, B. M., & Mhando, M. L. (2005). Early response of second-rotation *Pinus patula* stands to nitrogen and phosphate fertilizers at Sao Hill forest plantation, Tanzania. *Journal of Tropical Forest Science*, 17(1), 413–418. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/23616528>
- Martins, P., Sampedro, L., Moreira, X., & Zas, R. (2009). Nutritional status and genetic variation in the response to nutrient availability in *Pinus pinaster*. A multisite field study in Northwest Spain. *Forest Ecology and Management*, 258(7), 1429–1436. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.041
- Mavimbela, L. Z., Crous, J. W., Morris, A. R., & Chirwa, P. W. (2018). The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 48(5), 1–14. doi: 10.1186/s40490-018-0110-1
- Munsell, J. F., & Fox, T. R. (2010). An analysis of the feasibility for increasing woody biomass production from pine plantations in the southern United States. *Biomass*

- and *Bioenergy*, 34(12), 1631–1642. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.05.009
- Pan, J., Jacobs, D. F., & Li, G. (2017). Combined effects of short-day treatment and fall fertilization on growth, nutrient status, and spring bud break of *Pinus tabulaeformis* seedlings. *iForest*, 10(1), 242–249. doi: 10.3832/ifor2178-009
- Pérez-Soto, F., Figueroa-Hernández, E., García-Núñez, R. M., & Godínez-Montoya, L. (2017). *Genética y fertilización en la producción agrícola*. Texcoco, México: ECORFAN. Retrieved from [https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias de la Biología Agronomía y Economía T-I/HCBAE_TI.pdf](https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20de%20la%20Biología%20Agronomía%20y%20Economía%20T-I/HCBAE_TI.pdf)
- Reyes-Millalón, J., Gerding, V., & Thiers-Espinoza, O. (2012). Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3), 313–328. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.08.060
- Sáenz-Romero, C., Beaulieu, J., & Rehfeldt, G. E. (2011). Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. *Agrociencia*, 45(3), 399–411. Retrieved from <https://agrociencia-colpos.mx/index.php/agrociencia/article/view/887/887>
- Salaya-Domínguez, J. M., López-Upton, J., & Vargas-Hernández, J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5), 519–534. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952012000500009
- Salazar-García, J. G., Vargas-Hernández, J. J., Jasso-Mata, J., Molina-Galán, J. D., Ramírez-Herrera, C., & López-Upton, J. (1999). Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques*, 5(2), 19–34. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750203>
- Sánchez-Parada, A., López-López, M. Á., Gómez-Guerrero, A., & Pérez-Suárez, M. (2018). Critical nutrient concentrations and DRIS norms for *Pinus patula*. *Preprints*, 1–13. doi: 10.20944/preprints201801.0011.v1
- SAS Institute. (2015). *The mixed procedure. SAS/STAT[®] 14.1 User's Guide*. Cary, USA: Author. Retrieved from <https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/stat/930/mixed.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México: Diario Oficial de la Federación.
- Štofko, P. (2010). Effects of slow-release fertilizers of Silvamix and Silvagen line on growth of a young spruce and larch forest plantation three years after application. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 52(1), 54–60. doi: 10.5281/zenodo.30866
- Valencia-Manzo, S., & Vargas-Hernández, J. J. (2001). Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. *Agrociencia*, 35(1), 109–120. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235110>
- Vázquez-Cisneros, I., Prieto-Ruiz, J. A., López-López, M. A., Wehenkel, C., Domínguez-Calleros, C. P. A., & Muñoz-Sáez, F. E. (2018). Growth and survival of a plantation of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* under different fertilization treatments. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 24(2), 251–264. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.05.036
- Vásquez-García, I., López-López, M. Á., Ángeles-Pérez, G., Trinidad-Santos, A., Jiménez-Casas, M., & Aguilar-Benítez, G. (2015). Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31), 82–93. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v6n31/v6n31a7.pdf>
- Virginia Tech & USDA Forest Service. (2020). Research on forest climate change: Potential effects of global warming on forests and plant climate relationships in Western North America and Mexico. Retrieved May 31, 2020, from <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>
- Wells, C., & Allen, L. (1985). *A loblolly pine management guide: When and where to apply fertilizer*. Asheville, USA: US Department of Agriculture-Forest Service-Southern Forest Experiment Station. Retrieved from <http://www.srs.fs.usda.gov/pubs/viewpub.php?index=921>
- Zas, R., Pichel, F., Martins, P., & Fernández-López, J. (2006). Fertilization x genotype interaction in *Pinus radiata* open pollinated families planted in three locations in Galicia (NW Spain). *New Forests*, 32(3), 253–263. doi: 10.1007/s11056-006-9000-0
- Zhang, Y., Zhou, Z., & Yang, Q. (2013). Genetic variations in root morphology and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* under heterogeneous and homogeneous low phosphorus conditions. *Plant and Soil*, 364(1–2), 93–104. doi: 10.1007/s11104-012-1352-y