

ENSAYO DE ESPECIES Y PROCEDENCIAS PARA RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE RESIDUOS MINEROS EN TLALPUJAHUA, MICHOACÁN, MÉXICO

SPECIES AND PROVENANCE TRIAL FOR ECOLOGICAL RESTORATION OF MINE TAILINGS AT TLALPUJAHUA, MICHOACÁN, MEXICO

Verónica Osuna-Vallejo¹, R. Antonio Lindig-Cisneros¹, Arnulfo Blanco-García², José Cruz-deLeón³, Nahum M. Sánchez-Vargas⁴, Cuauhtémoc Sáenz-Romero^{5*}

¹Laboratorio de Ecología de la Restauración, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Colonia Ex Hacienda de San José de la Huerta, Morelia, Michoacán, 58190, México (rosuna@cieco.unam.mx; rlindig@cieco.unam.mx). ²Facultad de Biología, Edificio R, UMSNH, Avenida Francisco J. Mujica s/n, Colonia Felicitas del Río, 58030. Morelia Michoacán, México. (arnulfo blanco@yahoo.com.mx). ³Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH). Edificio D, Ciudad Universitaria, Avenida Francisco J. Mugica s/n, Colonia Felicitas del Río, 58030. Morelia Michoacán, México. (josecruzde@yahoo.com.mx). ⁴Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida San Juanito Itzicuaró s/n, Colonia Nueva Esperanza, 58330. Morelia, Michoacán, México. (nsanchezv@yahoo.com). ⁵Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida San Juanito Itzicuaró s/n, Colonia Nueva Esperanza, Morelia, Michoacán 58330, México. (csaenzromero@gmail.com).

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue probar la capacidad de especies arbóreas de sobrevivir y crecer a temprana edad (dos años después de la plantación en campo) a los residuos mineros en el suelo. En este estudio se evaluó el desempeño de cinco especies y un número variable de procedencias por especie de *Pinus pseudostrobus*, *P. martinezii*, *P. leiophylla*, *P. devoniana* y *Juniperus deppeana* en un sitio de sustrato minero en Tlalpujahua, Michoacán, centro-oeste de México, con diseño de siete bloques completos al azar, una a cuatro procedencias por especie. Altura final, incremento en altura de planta y crecimiento relativo fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.001$) entre especies. *P. pseudostrobus* y *P. devoniana* tuvieron el mayor incremento a dos años (133 y 94 cm) y *J. deppeana* mayor supervivencia (96%). *Pinus devoniana* es exótica al sitio de prueba y se localiza de manera natural en menor altitud que la plantación (2596 m), por lo que podría ser de utilidad para compensar los efectos del cambio climático.

Palabras clave: *Pinus*, *Juniperus deppeana*, residuos mineros, jales, migración asistida, *Pinus devoniana*.

ABSTRACT

The objective of this study was to test the ability of tree species to survive and grow at an early age (two years after transplant to the field) in soil with mine tailings. In this study, the performance of five species (*Pinus pseudostrobus*, *P. martinezii*, *P. leiophylla*, *P. devoniana* and *Juniperus deppeana*) and a variable number of provenances was evaluated in a site with mining substrate in Tlalpujahua, Michoacán, in central-west Mexico. An experimental design of seven complete randomized blocks with up to four provenances per each tree species was used. Plant total height, height increase, and relative growth were significantly different ($p \leq 0.001$) among species. *P. pseudostrobus* and *P. devoniana* had the highest growth at two years (133 and 94 cm), and *J. deppeana* had the highest survival rate (96%). *Pinus devoniana* is exotic to the test site and it grows naturally at a lower altitude than the plantation (2596 m), thus, this species might be useful for compensating the effects of climate change.

Key words: *Pinus*, *Juniperus deppeana*, mining waste, mine tailings, assisted migration, *Pinus devoniana*.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: enero, 2018. Aprobado: octubre, 2018.

Publicado como ARTÍCULO en Agrociencia 54: 101-114. 2020.

INTRODUCCIÓN

El objetivo de los estudios de especies y procedencias es probar su capacidad de sobrevivir y crecer en un lugar determinado para reforestar sitios que han sufrido perturbaciones (Bradshaw, 1984; Zobel y Talbert, 1988; Bradshaw, 1997). La procedencia (origen geográfico de una fuente de semilla) de las especies cobra mayor relevancia en el contexto del cambio climático, debido a que las poblaciones se diferencian genéticamente, para adaptarse al sitio en donde crecen, y tales diferencias necesitan considerarse para mantener un acoplamiento entre la población y el hábitat climático para el que están adaptadas (Rehfeldt, 1988; Rehfeldt *et al.*, 2017). El hábitat climático propicio para una especie o población se ha convertido en una “meta móvil”, debido a que el clima en un sitio dado, ocurrirá progresivamente a una altitud mayor (Ledig *et al.*, 2010) o en latitudes desplazadas hacia los polos (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). Esto creará un desfase adaptativo a nivel de cada población (Joyce y Rehfeldt, 2013; Rehfeldt *et al.*, 2009). Tal desfase inducirá una severa declinación forestal, que de hecho ya inició (Granados y López-Ríos, 2001; Allen *et al.*, 2010; Mátyás, 2010; Allen *et al.*, 2015). Por lo anterior, es necesario considerar medidas de migración asistida para realinear a las poblaciones con el clima que les es propicio, dado que por sí solas no tienen la capacidad de hacerlo con la rapidez necesaria en relación a la velocidad del cambio climático (McLachlan *et al.*, 2007; Castellanos-Acuña *et al.*, 2015; Hamann *et al.*, 2015; Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Algunos de los métodos de extracción y procesamiento de minerales en operaciones mineras ocasionan contaminación a escala regional, al depositar en los residuos mineros elementos tóxicos como el mercurio. Por lo tanto, representa un reto el rehabilitar estos sitios para recuperar los servicios ecosistémicos que brindan (Stojiljkovic *et al.*, 2014).

La restauración y rehabilitación asociadas a la remediación del impacto minero ha sido estudiada desde hace más de cinco décadas. En algunos casos es posible aplicar algunos de los principios ecológicos derivados de la teoría sucesional para acelerar el proceso de recuperación, de tal manera que se establezcan especies sucesionales tardías en el corto plazo (Bradshaw y Chadwick, 1980; Bradshaw 1984). Esto en muchos casos implica usar especies vegetales que

INTRODUCTION

The objective of species and provenances trials is to test their differential ability for survival and growth in a given place to reforest sites that have been disturbed (Bradshaw, 1984; Zobel and Talbert, 1988; Bradshaw, 1997). The provenance (geographic origin of a seed source) of species becomes more relevant in the current context of climate change since populations differentiate genetically to adapt to the site where they grow. These differences need to be considered to maintain the match between the population and the climate habitat to which that population is adapted (Rehfeldt, 1988; Rehfeldt *et al.*, 2017). The appropriate climate habitat for a species or population has become a “moving target” since the climate of a given site will occur progressively at a higher altitude (Ledig *et al.*, 2010) or at latitudes nearer to the poles (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). This will create an adaptive lag at the level of each population (Joyce and Rehfeldt, 2013; Rehfeldt *et al.*, 2009) which will induce severe reduction of forests, as it has actually begun (Granados and López-Ríos, 2001; Allen *et al.*, 2010; Mátyás, 2010; Allen *et al.*, 2015). For this reason, it is now necessary to consider measures of assisted migration to realign populations with the suitable climate for them, since they cannot migrate fast enough to keep up with the rate of climate change (McLachlan *et al.*, 2007; Castellanos-Acuña *et al.*, 2015; Hamann *et al.*, 2015; Sáenz-Romero *et al.*, 2016).

Some methods of mineral extraction and processing in mining operations cause regional pollution when toxic elements such as mercury are contained in mining waste. The challenge is to rehabilitate these sites to restore their ecosystem services (Stojiljkovic *et al.*, 2014).

The restoration and rehabilitation associated with remediation of the impact of mining has been studied for more than five decades. In some cases, it is possible to apply some of the ecological principles derived from the succession theory to accelerate the process of recovery so that late successional species can be established in a short time (Bradshaw and Chadwick, 1980; Bradshaw 1984). This often involves using plant species that establish obligated symbiotic relationships with soil microorganisms, as conifers with mycorrhizogenic fungi (Allen *et al.*, 2003). In this way, soil biogeochemical processes

establecen relaciones simbióticas obligadas con microorganismos del suelo, como las coníferas con hongos micorrizógenos (Allen *et al.* 2003). De tal forma que se reestablecen procesos biogeoquímicos a nivel del suelo, a la vez que se genera una cubierta arbórea, muchas veces con las especies características de un bosque maduro desde las primeras etapas del proceso de restauración ambiental.

El primer inventario de los bosques y montes de Michoacán (Pérez-Gil, 1885) mostró vegetación compuesta por encinos, oyameles, cedros, pinos y madroños en el municipio de Tlalpujahua, en el centro-oeste de México. Esta descripción coincide con una caracterización de la vegetación, en un gradiente altitudinal de menor a mayor altitud que incluye bosque mesófilo de montaña, de pino-encino y bosque de coníferas, de acuerdo con los tipos de vegetación de Miranda (1947) ampliados por Rzedowski (1972).

Tlalpujahua tiene una historia minera significativa de más de 400 años de explotación. Es una de las regiones mineras más antiguas del país, pues en el año de 1517 los indígenas ya explotaban plata en esta región. Uribe-Salas (2002) mencionó evidencia sobre distintas fechas del descubrimiento de las vetas de mineral, las cuales oscilan entre 1532 y 1558. En 1630 Tlalpujahua ya contaba con siete haciendas e ingenios de mina. Las ganancias de las minas en esa región eran altas, principalmente por la explotación de los indígenas que trabajaban en ellas. En 1813, Tlalpujahua se consideró uno de los distritos mineros más importantes del país, en 1882 trabajaban poco más de veinte negociaciones y seis molinos de metal y en 1887 habían 106 pertenencias mineras y 36 minas activas. Al finalizar el siglo XIX, en la montaña Somera se descubrieron las minas Estrella 1 y Estrella 2 y se estableció la Compañía Minera Las Dos Estrellas, con el capital francés de J. Fournier (actualmente un museo). Esta operó de 1898 a 1959 y produjo una bonanza al descubrir la veta madre La Verde y al emplear los más adelantados sistemas mineros metalúrgicos de su tiempo. Los principales minerales de extracción para Tlalpujahua eran oro y plata. Años más tarde las minas declinaron su producción y cerraron por incosteables en 1958. Durante la historia extractiva de Tlalpujahua existieron diferentes métodos para la separación del mineral de interés: método de fundición (1532-1554), método de patio o amalgamación (1550-1901), procedimiento de cianuración (1898-1941) y el sistema metalúrgico de flotación

are reestablished at the same time that tree cover is regenerated, often with species characteristic of a mature forest at the first stages of the process of environmental restoration.

The first inventory of fields and forests in Michoacán (Pérez-Gil, 1885) showed vegetation made up of oaks, firs, cedars, pines and evergreen shrubs in the municipality of Tlalpujahua, in central-west Mexico. This description coincides with a characterization of the vegetation on a low to high altitudinal gradient that includes mountain mesophyll forest, pine-oak and conifer forests, according to the types of vegetation described by Miranda (1947) and expanded by Rzedowski (1972).

Tlalpujahua has a history of major mining activity, more than 400 years of exploitation. It is one of the oldest mining regions of the country, since in 1517 Mexican natives were already mining Silver in this region. Uribe-Salas (2002) mentioned evidence of different dates when mineral veins were discovered, which oscillate between 1532 and 1558. In 1630, Tlalpujahua already had seven mining haciendas and processing plants. Mining profits in this region were high, mainly because native labor was exploited. In 1813, Tlalpujahua was considered one of the most important mining districts of the country. In 1882 there were a little more than twenty businesses and six metal mills, and in 1887 there were 106 mining claims and 36 active mines. At the end of the 19th century in the Somera mountain, the mines Estrella 1 and Estrella 2 were discovered and the Dos Estrellas Mining Company was established by J. Fournier with French capital (nowadays Dos Estrellas office house is a museum). This company operated from 1898 to 1959 using the most advanced mining metallurgical systems of its time. It produced great wealth when the mother vein La Verde was discovered. The main minerals extracted in Tlalpujahua were gold and silver. Later, production declined, and the mines were closed in 1958 because they were no longer profitable. During the extraction period in Tlalpujahua there were different methods of separating the target mineral: smelting (1532-1554), patio method or amalgamation (1550-1901), procedure in cyanide solution (1898-1941), and flotation (1941-1959). From 1901 to 1947, registers show that 22 343 740 Mg of mineral was extracted, 8% of which was mineral with economic value, but the rest is mining waste that remains in the tailings

(1941-1959). De 1901 a 1947 hay un registro de 22 343 740 Mg de mineral extraído, 8% del cual es mineral de aprovechamiento económico, lo demás es residuo minero y se queda en los jales de Tlalpujahua y El Oro. Las presas de jales se conformaron en 1902 y antes de esta fecha los residuos mineros se tiraban al río (Corona-Chávez *et al.* 2010; 2017). El jal de “Los Cedros”, en el cual se realizó el experimento, tiene un área de 39.4 ha de residuo minero, que no refleja el área original de los residuos mineros, ya que en 1947 hubo un deslave con consecuencias trágicas (Macías *et al.* 2015). Los residuos mineros o jales han tenido una regeneración natural parcial, aún después de 60 años de abandono de esta actividad (Corona-Chávez *et al.*, 2010). En los jales mineros se observa una vegetación fragmentada y asociada a sucesión primaria dominada por *Juniperus deppeana* Steud., la que se estableció en los jales por regeneración natural. En las cercanías de los jales se observan fragmentos remanentes del bosque original mixto de pino-encino y coníferas (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *J. deppeana*). La vegetación establecida dista mucho de ser la vegetación original.

La meta del estudio fue encontrar una técnica que permitiera establecer una cubierta arbórea en residuos mineros (conocidos como “jales”). Éstos tienen características poco propicias para el establecimiento de una cubierta vegetal similar a la original, debido a que contienen: poca materia orgánica (0.7%); pH alcalino (7.8 a 8.5); conductividad eléctrica variable ($> 8 \times 10^4 \text{ S m}^{-1}$); textura limosa (limo promedio 80% del total, arcilla de 7 a 10% y arena fina 7-38%); sílice 56-92%, aluminio 5-13%, hierro 3-5%, calcio 2.5-5% y potasio 1-2%; algunos de los elementos tóxicos son: arsénico (3.0-83.9 ppm) y plomo (16.5-317.5 ppm) (Corona-Chávez *et al.*, 2010; Osuna-Vallejo *et al.* 2017; una descripción detallada está en Corona-Chávez *et al.*, 2017). Esta condición representa un sistema complejo para el restablecimiento de la vegetación.

El objetivo de este estudio fue estimar la capacidad de especies y procedencias de coníferas para sobrevivir y crecer en un substrato donde predominan residuos mineros, incluyendo especies y procedencias originadas a menor altitud que las locales, al considerar que por el cambio climático, el clima en el futuro será más cálido que el actual. La hipótesis fue

de Tlalpujahua and El Oro. Tailing reservoirs were built in 1902; because before they were dumped into the river (Corona-Chávez *et al.* 2010; 2017). The tailings of “Los Cedros”, where this experiment was conducted, has an area of 39.4 ha of mining waste. This is not the original area of the tailings since in 1947 a landslide occurred with tragic consequences (Macías *et al.* 2015). Mining waste, or mine tailings, have undergone partial natural plant regeneration, even 60 years after mining activities were abandoned (Corona-Chávez *et al.*, 2010). In the tailings, fragmented vegetation established by natural regeneration is observed, associated with primary succession dominated by *Juniperus deppeana* Steud. Near the tailings, fragments remaining of the original mixed pine-oak and conifer forest (*Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. & Cham., *Pinus pseudostrobus* Lindl. and *J. deppeana*) can be seen. The vegetation established in the tailings are far from being the original vegetation.

The aim of this study was to find a technique that would allow establishing tree cover in mining waste (known as tailings). These tailings have characteristics that are unsuitable for establishing a plant cover resembling the original due to the following: they have little organic matter (0.7%), alkaline pH (7.8 to 8.5), variable electric conductivity ($> 8 \times 10^4 \text{ S m}^{-1}$), variable silt texture (average silt content 80% of the total, clay 7 to 10% and fine sand 7-38%); silica varies between 56 and 92%, aluminum 5-13%, iron 3-5%, calcium 2.5-5% and potassium 1-2%. Some of the toxic elements are arsenic (3.0-83.9 ppm) and lead (16.5-317.5 ppm) (Corona-Chávez *et al.*, 2010; Osuna-Vallejo *et al.* 2017. A detailed description can be found in Corona-Chávez *et al.*, 2017. This composition poses a complex system for reestablishing vegetation.

The objective of this study was to estimate the ability of conifer species and provenances to survive and grow in a substrate where mining waste predominate, including species and provenances originated at lower than local altitudes, considering that because of climate change, future climate will be warmer than the current climate. The hypothesis was that non-native species and non-local provenances would have better performance in terms of survival and growth than local native species which are found in nearby forest.

que especies y procedencias no locales podrían tener un mejor desempeño en supervivencia y crecimiento que las locales que se encuentran en los bosques circundantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio de especies y procedencias se estableció en campo en junio de 2015, en un sitio con jales localizado en el cerro Los Cedros, en la vecindad del pueblo de Tlalpujahua, en el extremo noroeste del estado de Michoacán, México a una altitud de 2596 m (Cuadro 1).

El estudio incluyó cinco especies de coníferas (*Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* Lindl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. martinezii* Larsen y *Juniperus deppeana*) (Cuadro 1). *P. pseudostrobus* es la especie dominante en el bosque natural circundante y la más deseada por los pobladores locales, por la rapidez de su crecimiento, buena forma de fuste y excelente calidad de la madera (López-Upton, 2002); sin embargo, su supervivencia es reducida cuando se planta en suelos degradados (Gómez-Romero *et al.*, 2012). *Pinus devoniana* es originaria de sitios con altitud menor, y por ello podría ser una especie adaptada a condiciones de clima más cálidos y secos como los proyectados en escenarios de cambio climático (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015). *Pinus leiophylla* está presente en el bosque natural circundante y es relativamente más resistente a sequía que

MATERIALS AND METHODS

This study of species and provenances was established in the field in June 2015 in a site with mine tailings located on the hill called “Los Cedros”, near the town of Tlalpujahua, in the northwestern limits of the state of Michoacán, Mexico at an altitude of 2596 m (Table 1).

The study included five species of conifers (*Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* Lindl., *P. leiophylla* Schiede ex Schltdl. & Cham., *P. martinezii* Larsen and *Juniperus deppeana*) (Table 1). *P. pseudostrobus* is the species that dominates in the neighboring natural forest and is the most appreciated by local inhabitants because of its rapid growth, good stem shape and excellent wood quality (López-Upton, 2002). However, survival is low when it is planted on degraded soils (Gómez-Romero *et al.*, 2012). *Pinus devoniana* is native to lower altitude sites and, for this reason, it could be a species adapted to warmer drier climate conditions, such as those projected in climate change scenarios (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015). *Pinus leiophylla* is present in the surrounding natural forest and is relatively more resistant to drought than other comparable species of this genus, except for pinyon pines (Martínez-Trinidad *et al.* 2002). *Pinus martinezii* is a species that has been little studied, but it also has been reported as apt for establishing on relatively alkaline soils (Farjon and Styles, 1997). *Juniperus deppeana* is the tree species dominating natural regeneration in the surrounding tailings (Osuna-Vallejo *et al.*,

Cuadro 1. Ubicación geográfica y clima (promedio 1961-1990) de las procedencias seleccionadas para el ensayo en los residuos mineros en el cerro denominado “Los Cedros”, Tlalpujahua, Michoacán, y del sitio de estudio.

Table 1. Geographic location and climate (1961-1990 average) of the provenances selected for the trial in mine tailings, on the hill called “Los Cedros”, Tlalpujahua (Michoacán, México) and at the study site.

Especie	Latitud (N)	Longitud (O)	Altitud (msnm)	Media anual Temp. (°C)	Media anual Precip. (mm)	Localidad	Estado
<i>P. pseudostrobus</i>	19° 27' 34.4"	102° 11' 43.6"	2520	14.5	1163	NSJP*	Michoacán
	19° 26' 50.1"	102° 11' 00.5"	2422	14.6	1117	NSJP	Michoacán
	19° 26' 24.6"	102° 10' 29.6"	2310	14.9	1143	NSJP	Michoacán
	19° 26' 05.1"	102° 10' 08.3"	2217	15.2	1176	NSJP	Michoacán
<i>P. leiophylla</i>	19° 26' 50.1"	102° 11' 00.5"	2422	14.6	1117	NSJP	Michoacán
	19° 26' 24.6"	102° 10' 29.6"	2310	14.9	1143	NSJP	Michoacán
	19° 26' 05.1"	102° 10' 08.3"	2217	15.2	1176	NSJP	Michoacán
	19° 25' 42.1"	102° 09' 34.6"	2110	15.5	1227	NSJP	Michoacán
<i>P. devoniana</i>	19° 26' 05.1"	102° 10' 08.3"	2217	15.2	1176	NSJP	Michoacán
	19° 25' 42.1"	102° 09' 34.6"	2110	15.5	1227	NSJP	Michoacán
	19° 25' 28.9"	102° 08' 57.8"	2034	15.8	1274	NSJP	Michoacán
<i>P. martinezii</i>	19° 47' 45.3"	100° 40' 16.2"	2747	13.3	1028	Los Azufres	Michoacán
<i>Juniperus deppeana</i>	18° 49' 47.0"	97° 32' 44.1"	2199	15.4	543	Palmar de Bravo	Puebla
Sitio de ensayo							
Jal Los Cedros	19° 48' 9.73"	100° 10' 03.48"	2596	12.8	906	Tlalpujahua	Michoacán

* NSJP: Nuevo San Juan Parangaricutiro.

otras especies comparables de ese género, excluidos los piñoneros (Martínez-Trinidad *et al.* 2002). *Pinus martinezii* es una especie poco estudiada que se ha reportado apta para suelos relativamente alcalinos (Farjon y Styles, 1997). *Juniperus deppeana* es la especie arbórea que domina la regeneración natural en los jales circundantes (Osuna-Vallejo *et al.*, 2017), por lo cual se consideró la especie testigo.

El diseño experimental se alojó en arreglo de bloques completos al azar, con siete bloques, cinco especies de coníferas, cada especie representada por tres a cuatro procedencias, excepto en *P. martinezii* y *J. deppeana*, las cuales estuvieron representadas por una sola procedencia; cada procedencia estuvo representada con cuatro plantas por parcela en cada bloque; la combinación de especie y procedencia (representada por las parcelas), se distribuyeron completamente al azar dentro de los bloques (Figura 1).

Las plantas en el ensayo procedieron de una colecta de semillas de 11 árboles por procedencia (excepto *J. deppeana*, que se consiguió por donación de un vivero forestal y se desconoce el número de individuos que originaron la semilla); se produjeron en envases rígidos de plástico de 1 L y tenían 18 meses de edad en vivero y en promedio 50.7 cm de altura antes de llegar al sitio de plantación. La plantación fue en marco real con 1.5 x 1.0 m de espaciamiento. La preparación del sitio consistió únicamente en cercado contra el ganado. No hubo remoción del estrato herbáceo, pero sí poda de algunas ramas de los árboles circundantes y que se encontraban dentro del área a plantar, para disminuir su sombra. Después de la plantación no hubo control del estrato herbáceo, pero sí una fumigación con insecticida por un brote de áfidos.

La supervivencia y el crecimiento (en altura de planta) se evaluó bimestralmente por 28 meses (julio 2015-noviembre 2017). El crecimiento se expresó para efecto del análisis, en tres formas: altura final, crecimiento (altura final menos altura inicial un mes después de la plantación) y crecimiento relativo [(crecimiento/altura inicial) x100]. Las últimas variables fueron relevantes para descartar el efecto de la altura inicial de la planta.

Para comprender la dinámica del crecimiento de las especies ensayadas, de febrero a junio del 2016 se evaluó la fenología de la elongación de la yema líder de las cuatro especies de pino, usando un índice con valores desde 1 (yema en latencia) al 5 (yema totalmente desarrollada; Cuadro 2) (Jach y Ceulemans, 1999; Viveros-Viveros *et al.*, 2007). La dominancia apical en *J. deppeana* no se evaluó porque esta especie no tenía una yema evidente susceptible de evaluación con el índice descrito.

Con los datos se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) usando GLM de SAS (SAS Institute, 2004), en donde cada especie se consideró con efecto fijo y los demás factores de variación con efectos aleatorios, bajo el siguiente modelo:

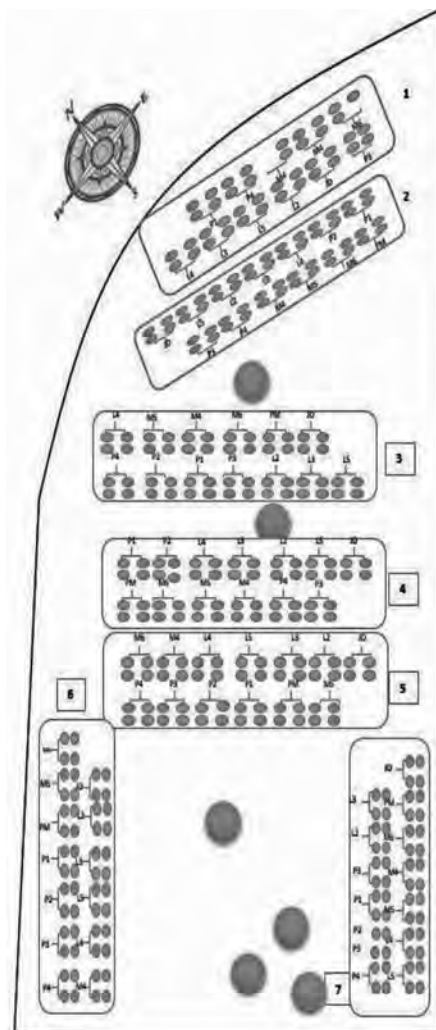


Figura 1. Croquis del ensayo de especies - procedencias.

Letras indican la especie (P = *Pinus pseudostrobus*, L = *P. leiophylla*, M = *P. devoniana*, PM = *P. martinezii*, JD = *Juniperus deppeana*). Números junto al código de especie indica la procedencia. Números grandes indican el número de bloque. Óvalos pequeños indican individuos. Debido a que el terreno es plano, los bloques se acomodaron de la mejor manera posible para evitar la sombra de árboles adultos de *J. deppeana* de regeneración natural, indicados como círculos grandes fuera de los bloques.

Figure 1. Layout of the species - provenance trial.

Letters indicate species (P = *Pinus pseudostrobus*, L = *P. leiophylla*, M = *P. devoniana*, PM = *P. martinezii*, JD = *Juniperus deppeana*). Numbers next to the species code indicate provenance. Large numbers indicate block label. Small ovals indicate individuals. Because the terrain is flat, the blocks were accommodated in the best possible way to avoid shade from the naturally regenerated adult *J. deppeana* trees, indicated as large circles outside the blocks.

Cuadro 2. Índice de desarrollo fenológico de la yema terminal.
Table 2. Index of phenological development of the terminal bud.

Estado de desarrollo

		
Yema en latencia.	La yema se encuentra parcialmente elongada y se observa la aparición del cojinete foliar o fascículo.	Elongación avanzada de la yema, pero aún las acículas no son visibles.
		
Yema casi completamente elongada. Se comienzan a distinguir las acículas emergiendo de los fascículos.	Yema completamente elongada, con las acículas de los fascículos bien desarrolladas, particularmente en la parte inferior del brote.	

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + P_j(S_j) + B_k + S_i B_k + E_{ijkl}$$

donde Y_{ijkl} = observación del l -ésimo individuo de la j -ésima procedencia de la i -ésima especie en el k -ésimo bloque; μ = media general; S_i = efecto de la i -ésima especie; $P_j(S_j)$ = efecto de la j -ésima procedencia anidada en la i -ésima especie; B_k = efecto del k -ésimo bloque; $S_i B_k$ = efecto de la interacción de la i -ésima especie con el k -ésimo bloque; E_{ijkl} = error.

2017), and because of that, it was considered the control species. The experimental design was arranged in a complete randomized blocks design with seven blocks and five species of conifers, each species represented by three to four provenances, except *P. martinezii* and *J. deppeana*, which were represented by a single provenance. Each provenance was represented with four plants per plot per block. The combinations of species and provenance (represented in the plots) were distributed at random within the blocks (Figure 1).

Después del ANDEVA se realizó una prueba múltiple de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dos años después de la plantación en campo, el ANDEVA indicó valores cercanos a diferencias en supervivencia entre especies ($p=0.0579$), en donde *J. deppeana* fue la especie con mejor supervivencia (96.4%), seguida de *P. pseudostrobus* (88.8%), *P. devoniana* (83.7%), *P. leiophylla* (81.2%), y con mucho menor supervivencia *P. martinezii* (58.3%). La prueba de Tukey indica que sólo *P. martinezii* tuvo una supervivencia menor ($p \leq 0.05$) que las otras cuatro especies estudiadas. La mortalidad ocurrió de manera gradual, sin un patrón de agregación espacial, y sin tener relación evidente con un brote de plagas o enfermedades, ni con un episodio extremo de sequía o helada.

El ANDEVA indica diferencias significativas entre especies para todas las variables de altura de planta evaluadas ($p \leq 0.0001$), pero no entre las procedencias de cada especie ($p > 0.09$). La interacción especie x bloque se consideró no significativa ($p > 0.498$) (Cuadro 3).

Pinus pseudostrobus fue la especie que alcanzó la mayor altura final (188 cm), le siguieron *P. devoniana* (130 cm), *P. leiophylla* (117 cm), *P. martinezii* (97 cm), y la especie con menor altura fue *J. deppeana* (69 cm) (Figura 2). No hubo diferencias significativas en altura final entre las procedencias de las especies (Cuadro 3).

Trial plants were grown from seeds collected from 11 trees per provenance (except for *J. deppeana*, whose seeds were donated by a forest nursery and the number of parental trees is unknown). They were produced in a nursery in 1 L rigid plastic recipients and were 18 months old and 50.7 cm tall on average before reaching the plantation site. The plantation was made in a planting frame of 1.5 x 1.0 m of spacing. Site preparation consisted only of fencing to keep livestock out. The herbaceous stratum was not removed, but some of the branches of neighboring trees in the planting area were pruned to decrease shading. After planting, there was no control of the herbaceous stratum, but we did fumigate with insecticide because of an outbreak of aphids.

Survival and growth (plant height) was assessed bi-monthly for 28 months (July 2015-November 2017). For the analysis, growth was expressed in three ways: total plant height, growth (final height minus initial height one month after planting) and relative growth [(growth/initial height) x100]. The latter two variables were relevant to rule out the effect of plant initial height.

In order to understand the growth dynamics of the trial species, from February to June 2016 the elongation phenology of terminal (apical) bud was evaluated in the four pine species using an index with values from 1 (latent bud) to 5 (full developed bud; Table 2) (Jach and Ceulemans, 1999; Viveros-Viveros *et al.*, 2007). Height dominance in *J. deppeana* was not evaluated because this species did not have an evident bud that could be susceptible to evaluation with the described index.

With the data, an analysis of variance (ANOVA) was performed using GLM of SAS (SAS Institute 2004), where the species was considered the fixed effect and the rest of the factors of variation were considered as random effects, as in the model:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + P_j(S_i) + B_k + S_i B_k + E_{ijkl}$$

Cuadro 3. Análisis de varianza de la altura de las plantas del ensayo de campo de especies y procedencias, Tlalpujahua, Michoacán.

Table 3. Analysis of variance of plant height in the field species - provenances trial, at Tlalpujahua, Michoacán.

Fuente de variación	g.l.	Altura final		Incremento en altura		Crecimiento relativo	
		F	P	F	P	F	P
Bloque	6	0.82	0.5617	0.46	0.8311	2.61	0.0339
Especie	4	30.81	0.0001	27.52	0.0001	31.56	0.0001
Procedencia(Especie)	8	1.72	0.0941	1.53	0.1477	1.33	0.2265
Bloque*Especie	21	0.97	0.4978	1.71	0.0295	0.97	0.5021
Error	252						

g.l. = grados de libertad. F = Valor de F de Fisher. P = Probabilidad ♦ g.l. = degrees of freedom; F = Fisher F-value; P = probability.

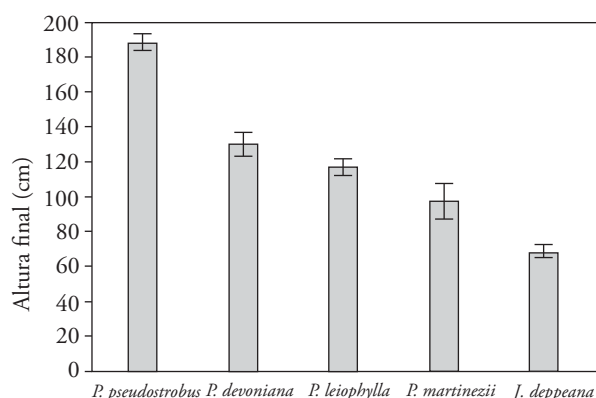


Figura 2. Promedios de altura final por especie.

Registrada en noviembre del 2017; dos años cuatro meses después de la plantación en el jal de Los Cedros, Talpujahua, Michoacán. Al término del experimento, $n = 108, 80, 112, 23$ y 28 , para *P. pseudostrobus*, *P. devoniana*, *P. leiophylla*, *P. martinezii* y *J. deppeana*, respectivamente. Las barras verticales indican el error estándar.

Figure 2. Averages of final height by species.

Recorded in November 2017, two years four months after planting in the mine tailings field of Los Cedros, Talpujahua, Michoacán. At the end of the experiment, $n = 108, 80, 112, 23$ and 28 , of *P. pseudostrobus*, *P. devoniana*, *P. leiophylla*, *P. martinezii* and *J. deppeana*, respectively. Vertical bars indicate the standard error.

En el análisis de incremento en altura de planta *P. pseudostrobus* fue la especie que más creció (133 cm de aumento en dos años), le siguió *P. devoniana* (94 cm), *P. martinezii* (69 cm), *P. leiophylla* (56 cm), y la especie con menor aumento en altura fue *J. deppeana* (22 cm) (Figura 3).

El análisis del crecimiento relativo (incremento en altura de planta expresado en proporción a la altura inicial) confirman estos resultados: las dos especies con el mayor crecimiento relativo fueron *P. pseudostrobus* y *P. devoniana* (Figura 4).

Es importante enfatizar el buen desempeño de *P. devoniana*, aun cuando su plantación implicó una migración altitudinal hacia arriba de 500 m en promedio (las procedencias estudiadas se originaron a 2034, 2110 y 2217 m de altitud y el sitio de plantación está a 2600 m).

Las especies con un menor crecimiento, *P. leiophylla*, *P. martinezii* y *J. deppeana*, se localizan en un solo grupo (Cuadro 4).

El índice de la fenología en la elongación de la yema indicó que *P. pseudostrobus* es la especie que mostró una elongación de yema más precoz (Figura

where Y_{ijkl} = observation of the l^{th} individual of the j^{th} provenance of the i^{th} species in the k^{th} block; μ = the general mean; S_i = effect of the i^{th} species; $P_j(S_i)$ = effect of the j^{th} provenance nested in the i^{th} species; B_k = effect of the k^{th} block; $S_i B_k$ = effect of the interaction of the i^{th} species with the k^{th} block; E_{ijkl} = error.

After the ANOVA, a Tukey multiple means test was performed ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

The ANOVA nearly indicated differences in survival among the species ($p = 0.0579$) two years after planting in the field. *J. deppeana* was the species with the highest survival rate (96.4%) followed by *P. pseudostrobus* (88.8%), *P. devoniana* (83.7%), *P. leiophylla* (81.2%). *P. martinezii* (58.3%) had far lower survival. The Tukey test indicated that only *P. martinezii* had a survival rate that was lower ($p \leq 0.05$) than the other four studied species. Mortality occurred gradually, with no pattern of spatial aggregation and no evident relationship with an outbreak of pests or diseases or with an extreme event of drought or freezing temperature.

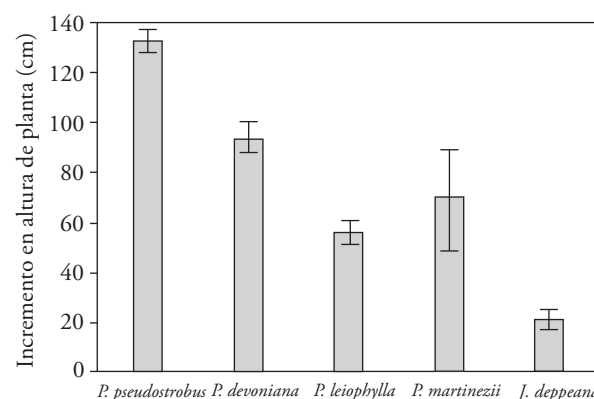


Figura 3. Promedios del incremento en altura de las plantas.

Durante el período Junio 2015 – Noviembre 2017, en el estudio de campo de especies y procedencias, Talpujahua, Michoacán (n se indicó en la Figura 2). Las barras verticales indican el error estándar.

Figure 3. Averages of plant height increase.

During the period June 2015 – November 2017 in the field species - provenances trial, at Talpujahua, Michoacán (n was indicated in Figure 2). Vertical bars indicate standard error.

5), ya que en abril llegó a un estadio casi final de la elongación de la yema, mientras que *P. leiophylla* presenta una elongación de yema más tardía (en abril *P. leiophylla* tiene la mitad del grado de desarrollo que *P. pseudostrobus*, de acuerdo con el valor del índice de desarrollo fenológico). En las otras tres especies la elongación de la yema terminal se retrasó hasta mayo. Esto explica en parte el crecimiento mayor de *P. pseudostrobus*; sin embargo, la elongación temprana hace a la especie potencialmente más vulnerable a las heladas que se presentan de diciembre a febrero (Viveros-Viveros *et al.*, 2007).

La supervivencia fue muy elevada para todas las especies, contrario a lo esperado para un suelo de jal. En particular, el porcentaje de supervivencia de *J. deppeana* fue muy alto, lo cual indica que esta especie puede mostrar plasticidad fenotípica, soportando suelos degradados, frecuentemente calizos (Martínez 1963; Osuna-Vallejo *et al.* 2017). La supervivencia de los pinos se esperaba menor, ya que el bajo desempeño de las especies de este género es común en suelos degradados por la ausencia de la capa superficial del suelo, la baja retención de humedad, en algunos casos la compactación extrema, escasez de nutrientes esenciales ligada a la ausencia de la capa orgánica (Harris *et al.* 1996), el pH alcalino y el contenido alto de metales pesados (Wong *et al.*, 1999).

Pinus devoniana destacó en el desempeño en crecimiento, ya que es la especie que más se migró altitudinalmente hacia arriba (en promedio 500 m de diferencia altitudinal, desde su origen al sitio de plantación). Esto indica que tiene buena capacidad adaptativa y es consistente con resultados previos de migración asistida, en los que se demostró que

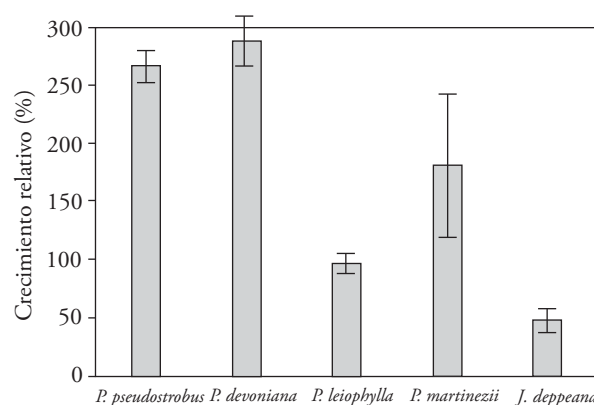


Figura 4. Promedios de crecimiento relativo por especie en el jal “Los Cedros” en Talpupujahua, Michoacán; n se indicó en la Figura 2. Las barras verticales indican el error estándar.

Figure 4. Averages of relative growth in tailings of “Los Cedros” in Talpupujahua, Michoacán, by species; n was indicated in Figure 2. Vertical bars indicate standard error.

The ANOVA indicated significant differences ($p \leq 0.0001$) among species for all the evaluated variables of plant height but not among provenances of each species ($p > 0.09$). The interaction species $\times$ block was considered not significant ($p > 0.498$) (Table 3).

Pinus pseudostrobus was the species that reached the highest final height (188 cm), followed by *P. devoniana* (130 cm), *P. leiophylla* (117 cm), and *P. martinezii* (97 cm). The shortest species was *J. deppeana* (69 cm) (Figure 2). There were no significant differences in final height among the provenances within the species (Table 3).

Cuadro 4. Promedio por especie de variables de crecimiento en altura de planta y agrupamiento de prueba múltiple de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

Table 4. Average per species of plant height growth, grouped by the Tukey multiple means test ($p \leq 0.05$).

Altura final		Incremento en altura		Crecimiento relativo	
Media (cm)	Especie	Media (cm)	Especie	Media (%)	Especie
188.4 a	<i>P. pseudostrobus</i>	132.7 a	<i>P. pseudostrobus</i>	286.0 a	<i>P. devoniana</i>
130.2 b	<i>P. devoniana</i>	94.4 ab	<i>P. devoniana</i>	265.8 a	<i>P. pseudostrobus</i>
116.9 bc	<i>P. leiophylla</i>	69.5 b	<i>P. martinezii</i>	180.3 ab	<i>P. martinezii</i>
97.3 bc	<i>P. martinezii</i>	56.3 bc	<i>P. leiophylla</i>	97.3 bc	<i>P. leiophylla</i>
68.8 c	<i>J. deppeana</i>	21.9 c	<i>J. deppeana</i>	48.1 c	<i>J. deppeana</i>

Medias con diferentes letras en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey; $p \leq 0.05$) ♦
Means in a column with different letters are statistically different (Tukey, $p \leq 0.05$).

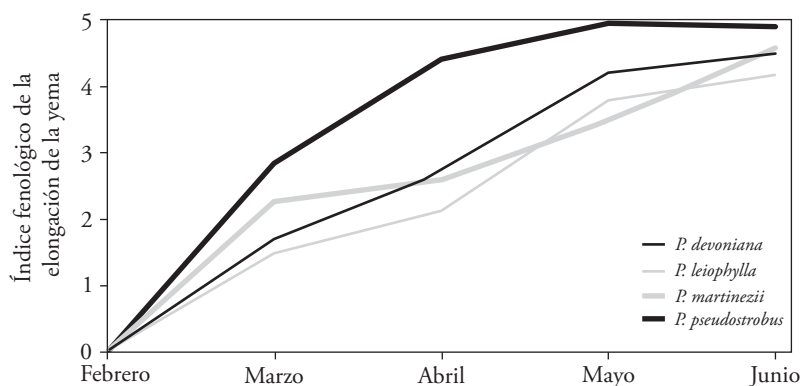


Figura 5. Valores promedio por especie del índice de desarrollo fenológico de la elongación de la yema apical durante el año 2016. El índice tiene valores de 1 = yema en latencia, hasta 5 = yema totalmente elongada y desarrollada (detalles en el Cuadro 2).

Figure 5. Average values by species of the bud elongation phenological development index of the terminal bud during the year 2016. Values of the index are 1 = latent bud to 5 = totally elongated and developed bud (details in Table 2).

es viable desplazar las procedencias hacia arriba con aproximadamente 400 m de diferencia altitudinal (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015) y en estudios en sitios con degradación severa mostró una supervivencia muy aceptable (Gómez-Romero *et al.*, 2013). Una migración asistida de 300 m hacia arriba en altitud sería suficiente para compensar el cambio climático proyectado para la década a partir del año 2030 (Sáenz-Romero *et al.*, 2010), por lo que la adaptabilidad de esta especie al desplazarla 500 m hacia arriba permite suponer un buen desempeño en esa década y más allá.

Pinus leiophylla se ha identificado con potencial alto para resistir suelos degradados, con capacidad para adaptarse a ambientes diversos y tolerante a condiciones de estrés, como sequía, suelos salinos y temperaturas elevadas (Vargas-Hernández y Muñoz-Orozco, 1988; Martínez-Trinidad *et al.* 2002; Rodríguez-Franco, 2002; Blanco-García y Lindig-Cisneros, 2005; Gómez-Romero *et al.* 2012; 2013; 2015; Jiménez-Casas y Zwiazek, 2014). Sin embargo, en nuestro estudio fue la segunda especie con menor supervivencia y su crecimiento fue intermedio.

La precocidad de la elongación de la yema líder de *P. pseudostrobus*, si bien le confiere mayor capacidad de crecimiento, lo hace susceptible al daño por heladas tempranas. Esto fue demostrado por Viveros-Viveros *et al.* (2005; 2007), cuyos resultados evidencian que la elongación temprana de la yema de *P. pseudostrobus* hace a esta especie más susceptible al daño por heladas, en comparación con *P. montezumae* y *P. hartwegii*.

The analysis of plant height increase revealed that *P. pseudostrobus* was the species that grew the most (133 cm increase in two years), followed by *P. devoniana* (94 cm), *P. martinezii* (69 cm), and *P. leiophylla* (56 cm), and the species with the smallest increase in height was *J. deppeana* (22 cm) (Figure 3).

The analysis of relative growth (increase in plant height expressed as a proportion from initial height) confirm these results: the two species with the highest relative growth were *P. pseudostrobus* and *P. devoniana* (Figure 4).

The good performance of *P. devoniana* must be emphasized. This, even when its plantation site involved an upward altitudinal migration of 500 m on average (the studied provenances originated at altitudes of 2034, 2110 and 2217 m, while plantation site is at 2600 m).

The species with lower growth, *P. leiophylla*, *P. martinezii* and *J. deppeana*, appear in a single group (Table 4).

The index of bud elongation phenology indicated that *P. pseudostrobus* is the species that had earlier bud elongation (Figure 5). In April it reached an almost final stage of bud elongation, while *P. leiophylla* had a latter bud elongation (in April *P. leiophylla* had developed half the elongation of *P. pseudostrobus*, according to the value of the index of phenological development). Bud elongation of the other three species was delayed until May. This partly explains the greater growth of *P. pseudostrobus*. However, early bud elongation makes it potentially more vulnerable to frosts, which occur from December to February (Viveros-Viveros *et al.*, 2007).

La falta de diferencias significativas entre procedencias originadas de gradientes altitudinales en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michocán, fue contrario a resultados previos *P. pseudostrobus* plantado en un ensayo de jardín común (Sáenz-Romero *et al.* 2012), y en *P. devoniana* y *P. leiophylla*, en vivero (Castellanos-Acuña *et al.* 2013), en los cuales se han encontrado diferencias significativas en biomasa y altura de planta, respectivamente. Es posible que el estrés inducido por las condiciones adversas del sustrato, hayan impedido la plena expresión del potencial de crecimiento de las procedencias.

CONCLUSIONES

Pinus pseudostrobus y *P. devoniana* mostraron el mayor incremento en altura de planta, lo que indica su capacidad para sobrevivir y crecer en las condiciones adversas del suelo con desechos mineros (jales) en Tlalpujahua, Michoacán. *Juniperus deppeana* exhibió el menor crecimiento (algo característico de la especie), pero tuvo la mayor supervivencia, lo cual indica que es la especie menos afectada por los desechos mineros.

Las procedencias evaluadas de *P. devoniana* se originaron en promedio a 500 m de altitud menor que el sitio de estudio, lo cual sugiere que esta especie podría adaptarse a climas más cálidos como los proyectados en los escenarios comunes de cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

A la Coordinación de la Investigación Científica de la UMSNH, a CSR y ABG, del programa PAPIIT de la UNAM (IN203316) y a RALC por el financiamiento de la investigación. Al CONACyT por la beca (241179) otorgada a V. Osuna-Vallejo. Al Sr. Blas Hernández Chaparro, propietario del terreno en el cual se estableció el ensayo, por las facilidades brindadas para realizarlo. A la Sra. María Elena Ramírez Sánchez, de Tlalpujahua, Michoacán por facilitar el acceso. También se agradecen los valiosos comentarios de un editor y dos revisores anónimos, que ayudaron a mejorar significativamente el manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Allen, M. F., W. Swenson, J. I. Querejeta, L. M. Egerton-Warburton, and K. K. Treseder. 2003. Ecology of mycorrhizae: a conceptual framework for complex interactions among plants and fungi. *Ann. Rev. Phytopathol.* 41: 271-303.
- Allen, C. D., A. K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, and N. Cobb. 2010. A global

Survival of all the species was very high, opposite to what was expected in a mine tailings substrate. Particularly, the percentage of survival of *J. deppeana* was very high, indicating that this species is capable of phenotypical plasticity, tolerant to degraded soils, frequently limestones (Martínez 1963; Osuna-Vallejo *et al.*, 2017). Survival of the pines was expected to be lower since poor performance of the species in this genus is common in degraded soils, due to the absence of topsoil, low moisture retention, in some cases extreme compaction, scarcity of essential nutrients linked to the absence of an organic layer (Harris *et al.* 1996), alkaline pH, and high content of heavy metals (Wong *et al.*, 1999).

Pinus devoniana showed an outstanding growth. It is the species that altitudinally migrated the farthest (upwards, an average of 500 m difference in altitude from its origin to the plantation site). This indicates that it is highly capable of adapting. This is consistent with previous results on assisted migration, which showed that it is viable to move provenances upwards approximately 400 m in altitude (Castellanos-Acuña *et al.*, 2015). Also, in studies conducted in severely degraded sites *P. devoniana* has shown very acceptable survival (Gómez-Romero *et al.*, 2013). Assisted upward migration of 300 m would be sufficient to compensate the climate change projected for the decade of the 2030s (Sáenz-Romero *et al.*, 2010). For this reason, the species adaptability to an upwards movement of 500 m suggests that it would have good performance to that decade and beyond.

Pinus leiophylla has been identified with high potential to tolerate degraded soils as well as to adapt to diverse environments, in stress conditions such as saline soils and high temperatures (Vargas-Hernández and Muñoz-Orozco, 1988; Martínez-Trinidad *et al.* 2002; Rodríguez-Franco, 2002; Blanco-García and Lindig-Cisneros, 2005; Gómez-Romero *et al.* 2012; 2013; 2015; Jiménez-Casas and Zwiazek, 2014). However, in our study *P. leiophylla* was the species with second to the lowest survival and its growth was intermediate.

Early elongation of the terminal bud of *P. pseudostrobus*, although it confers greater growing capacity, makes the species susceptible to damage by early frosts. This was demonstrated by Viveros-Viveros *et al.* (2005; 2007), whose results evidenced that early *P. pseudostrobus* bud elongation makes the species more susceptible to frost than *P. montezumae* and *P. hartwegii*.

- overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* 259: 660-684.
- Allen, C. D., D. D. Breshears, and N. G. McDowell. 2015. On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6(8) Article 129:1-55.
- Blanco-García, A., and R. Lindig-Cisneros. 2005. Incorporating restoration in sustainable forestry management: using pine-bark mulch to improve native species establishment on tephra deposits. *Restor. Ecol.* 13: 703-709.
- Bradshaw, A. D., y M. J. Chadwick. 1980. The restoration of land: the ecology and reclamation of derelict and degraded land. University of California Press. Los Angeles. EUA. 317 p.
- Bradshaw, A. D. 1984. Ecological principles and land reclamation practice. *Landscape Planning* 11: 35-48. Understanding the fundamentals of succession. In: Miles, J., and D. H. Walton (eds). *Primary Succession on Land*. Blackwell Publishing, Oxford UK. pp: 1-3.
- Bradshaw, A. 1997. Restoration of mined lands—using natural processes. *Ecol. Eng.* 8:255–269.
- Castellanos-Acuña D., C. Sáenz-Romero, R. A. Lindig-Cisneros, N. M. Sánchez-Vargas, P. Lobbit, y J. C. Montero-Castro. 2013. Variación altitudinal entre especies y procedencias de *Pinus pseudostrobus*, *P. devoniana* y *P. leiophylla*. *Ensayo de vivero. Rev. Chapingo Serie Ciencias For. Ambiente* 19: 399-412.
- Castellanos-Acuña, D., R. Lindig-Cisneros, and C. Sáenz-Romero. 2015. Altitudinal assisted migration of Mexican pines as an adaptation to climate change. *Ecosphere* 6: 1-16.
- Corona-Chávez, P., A. J. Uribe-Salas, N. Razo-Pérez, and M. Martínez-Medina. 2010. The impact of mining in the regional ecosystem: the mining district of El Oro and Tlalpujahua, México. *De. Re. Metallica* 15:21–34.
- Corona-Chávez, P., R. Maldonado, Y.P. Ramos-Arroyo, J. Robles-Camacho, R. Lozano-SantaCruz, y M. Martínez-Medina. 2017. Geoquímica y mineralogía de los jales del distrito minero Tlalpujahua-El Oro, México, y sus implicaciones de impacto ambiental. *Rev. Mex. Cienc. Geol.* 34: 250-273.
- Farjon, A. and B. T. Styles. 1997. *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph* 75: 171-175.
- Gómez-Romero, M., J. C. Soto-Correa, J. A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas, and R. Lindig-Cisneros. 2012. Testing of pine species for restoration of degraded sites. *Agrociencia* 46: 795-807.
- Gómez-Romero, M., E. de la Barrera, J. Villegas, and R. Lindig-Cisneros. 2013. Fertilization and association with pioneer herbaceous species on the performance of *Pinus pseudostrobus*. *Phyton* 82:135-143.
- Gómez-Romero, M., R. Lindig-Cisneros, C. Sáenz-Romero, and J. Villegas. 2015. Effect of inoculation and fertilization with phosphorus on the survival and growth of *Pinus pseudostrobus*, in eroded acrisols. *Ecol. Eng.* 82: 400-403.
- Granados, D., y G. F. López-Ríos. 2001. Declinación forestal. *Rev. Chapingo serie Cienc. For. Ambiente* 7: 5-13.
- Hamann, A., D. R. Roberts, Q. E. Barber, C. Carroll, and S.E. Nielsen. 2015. Velocity of climate change algorithms for guiding conservation and management. *Global Change Biol.* 21: 997-1004.
- There were no significant differences among provenances from altitudinal gradients in Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. This result was opposite to previous results in *P. pseudostrobus* planted in a common garden test (Sáenz-Romero *et al.*, 2012) and in *P. devoniana* and *P. leiophylla* in nurseries (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013), which found significant differences in biomass and plant height, respectively. It is possible that stress induced by adverse conditions of the substrate may have prevented the full expression of the growth potential of the provenances.

CONCLUSIONS

Pinus pseudostrobus and *P. devoniana* had the largest increment in plant height, indicating their ability to survive and grow in adverse soil conditions with mine tailings in Tlalpujahua, Michoacán. *Juniperus deppeana* exhibited the least growth (somewhat characteristic of the species), but also had the highest survival rate, thus indicating this species is the least affected by mining waste.

The evaluated provenances of *P. devoniana* were originated at an altitude 500 m below the trial site, suggesting that this species can adapt to warmer climates such as those projected in common climate change scenarios.

—End of the English version—



- Harris, J. A., J. P. Birch, and J. Palmer. 1996. *Land Restoration and Reclamation. Principles and Practice*. Longman. London. 230 p.
- Jach, M. E., and R. Ceulemans. 1999. Effects of elevated atmospheric CO₂ on phenology, growth and crown structure of Scots pine (*Pinus sylvestris*) seedlings after two years of exposure in the field. *Tree Physiol.* 19:289-300.
- Jimenez-Casas, M., and J. J. Zwiazek. 2014. Adventitious sprouting of *Pinus leiophylla* in response to salt stress. *Ann. For. Sci.* 71: 811-819.
- Joyce, D. G., and G. E. Rehfeldt. 2013. Climatic niche, ecological genetics, and impact of climate change on eastern white pine (*Pinus strobus* L.): Guidelines for land managers. *Forest Ecol. Manage.* 295: 173-192.
- Ledig, F. T., G. E. Rehfeldt, C. Sáenz-Romero, and C. Flores-López. 2010. Projections of suitable habitat for rare species under global warming scenarios. *Am. J. Bot.* 97:970–987.

- López-Upton, J. 2002. *Pinus pseudostrobus* Lindl. In: Vozzo, J. A. (ed). Tropical Tree Seed Manual. USDA Forest Service. pp: 636-638.
- Macías J. L., P. Corona-Chávez, J. M. Sánchez-Núñez, M. Martínez-Medina, V. H. Garduño-Monroy, L. Capra, F. García-Tenorio, and G. Cisneros-Máximo. 2015. The 27 May 1937 catastrophic flow failure of gold tailings at Tlalpujahua, Michoacán, Mexico. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15:1069-1085.
- Martínez, M. 1963. Las Pináceas Mexicanas. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 400 p.
- Martínez-Trinidad, T., J. J. Vargas-Hernández, A. Muñoz-Orozco, y J. López-Upton. 2002. Respuesta al déficit hídrico en *Pinus leiophylla*: consumo de agua y crecimiento de plántulas de diferentes poblaciones. *Agrociencia* 36:365-376.
- Mátyás, C. 2010. Forecasts needed for retreating forests. *Nature* 464: 1271.
- McLachlan, J. S., J. J. Hellmann, and M. W. Schwartz. 2007. A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. *Conserv. Biol.* 21: 297-302.
- Miranda, F. 1947. Estudios sobre la vegetación de México. V. Rasgos de la vegetación en la Cuenca del Río de las Balsas. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 8: 95-114.
- Osuna-Vallejo, V., C. Sáenz-Romero, J. Villegas, and R. Lindig-Cisneros. 2017. Species and provenance trial conducted for selection of conifers to be used in the restoration of mine dumps. *Ecol. Eng.* 105: 15-20
- Pérez-Gil, F. 1885. Primer inventario de los bosques y montes de Michoacán 1885. Colección de documentos para la historia del medio ambiente del estado de Michoacán; Serie Fuentes para la historia ambiental de Michoacán. Edición facsimilar (2006). Instituto de Investigaciones Históricas e Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán. 142 p.
- Rehfeldt, G. E. 1988. Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. *Silvae Genet.* 37: 131-135
- Rehfeldt, G. E., D. E. Ferguson, and N. L. Crookston. 2009. Aspen, climate and sudden decline in western USA. *Forest Ecol. Manage.* 258: 2353-2364.
- Rehfeldt, G. E., L. P. Leites, D.G. Joyce, and A. R. Weiskittel. 2017. Role of population genetics in guiding ecological responses to climate. *Glob. Change. Biol.* 24: 858-868.
- Rodríguez-Franco, C. 2002. *Pinus leiophylla* Schtdl. & Cham. In: CAB International (ed). Pines of Silvicultural Importance. CABI publishing, Wallingford pp: 202-205.
- Rzedowski, J. 1972. Contribuciones a la fitogeografía florística e histórica de México. II. Afinidades geográficas de la flora fanerogámica de diferentes regiones de la República Mexicana. *An. Esc. Nac. Cienc. Biol. Méx.* 19: 45-48.
- Sáenz-Romero, C., G. E. Rehfeldt, N. L. Crookston, D. Pierre, R. St-Amant, J. Beaulieu, and B. Richardson. 2010. Spline models of contemporary, 2030, 2060 and 2090 climates for Mexico and their use in understanding climate-plant impacts on vegetation. *Clim. Change.* 102: 595-623.
- Sáenz-Romero C, G. E. Rehfeldt, J. C. Soto-Correa, S. Aguilar-Aguilar, V. Zamarripa-Morales, and J. López-Upton. 2012. Altitudinal genetic variation among *Pinus pseudostrobus* populations from Michoacán, México; two location shade-house test results. *Rev. Fitotec. Mex.* 35: 111-120
- Sáenz-Romero, C., R. Lindig-Cisneros, D. G. Joyce, J. Beaulieu, J. B. St-Clair, and B. C. Jaquish 2016. Assisted migration of forest populations for adapting trees to climate change. *Rev. Chapingo Ser. Cie. For Amb.* 22: 303- 323.
- SAS Institute. 2004. SAS/STAT guide for personal computers. Versión 9.1. SAS Institute, Cary, North Carolina, USA. 1042 p.
- Stojiljkovic, E., M. Grozdanovic, and D. Marjanovic. 2014. Impact of the underground coal mining on the environment. *Acta Montanistica Slovaca* 19: 6-14.
- Uribe-Salas, J.A., 2008, Historia de la Minería en Michoacán. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Sociedad Mexicana de Mineralogía, Museo Tecnológico del Siglo XIX "Las Dos Estrellas". Morevallado Editores. Morelia, Michoacán. 227 p.
- Vargas-Hernández J. J., y A. Muñoz-Orozco. 1988. Resistencia a sequía: II. crecimiento y supervivencia en plántulas de cuatro especies de *Pinus*. *Agrociencia* 72:197-208.
- Viveros-Viveros, H., C. Sáenz-Romero, J. López-Upton, and J.J. Vargas-Hernández. 2005. Altitudinal genetic variation in plant growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl. in field testing. *Agrociencia* 39: 575-587.
- Viveros-Viveros H., C. Sáenz-Romero, J. López-Upton, and J. J. Vargas-Hernández. 2007. Growth and frost damage variation among *Pinus pseudostrobus*, *P. montezumae* and *P. hartwegii* tested in Michoacán, México. *For. Ecol. Manage.* 253: 81-88.
- Wong, M. H., C. Y. Lan, Gao, and H. M. Chen. 1999. Current approaches to managing and remediating metal contaminated soils in China. In: Proc. 5th Int. Conf. Biogeochem. Trace Elements, Vienna, Austria, July 1999.
- Zobel, B. and J. Talbert. 1988. Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales. 1era Ed. North Carolina State University. Limusa, México. 545 p.