



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DOCTORAL

**ESTABLECIMIENTO DE DOS ENSAYOS DE
PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schldl. et
Cham. EN LA ZONA CENTRO DE SU DISTRIBUCIÓN**

Para obtener el grado de
Doctora en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA

Sandra Luz Fuentes Amaro

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Tulancingo de Bravo, Hgo. Méx. mayo 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

TESIS DOCTORAL

**ESTABLECIMIENTO DE DOS ENSAYOS DE
PROGENIE DE *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et
Cham. EN LA ZONA CENTRO DE SU DISTRIBUCIÓN**

Para obtener el grado de
Doctora en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA

Sandra Luz Fuentes Amaro

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Comité tutorial

Dr. Ramón Razo Zarate

Dr. Joel Meza Rangel

Dr. Marcos Jiménez Casas

Tulancingo de Bravo, Hgo. Méx. mayo 2022

ACTA DE REVISIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
Instituto de Ciencias Agropecuarias
School of Forestry and Environmental Studies

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DEL ICAP

Acta de reunión del Comité de Tesis de Doctorado en Ciencia Agropecuarias

Apertura:

La reunión ordinaria para evaluar los avances de la tesis intitulada: "**Establecimiento de dos ensayos de progenie de *Pinus patula* en la zona centro de su distribución**", que desarrolla el (la) estudiante **Sandra Luz Fuentes Amaro**

Asistentes:

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna
Dr. Ramón Razo Zárate
Dr. Joel Meza Rangel
Dr. Marcos Jiménez Casas

A. Revisión de Trabajo de Tesis

Observaciones:

El comité revisó con antelación el trabajo de tesis en extenso propuesto por el estudiante, comunicando a el estudiante, **Sandra Luz Fuentes Amaro**, oportunamente las correcciones, adiciones y/o modificaciones que debería considerar para mejorar su trabajo y poder continuar con el proceso de obtención de grado. El estudiante atendió de forma conveniente las sugerencias del comité.

B. Acuerdos

En esta fecha, se comunica atentamente que el comité conformado por los profesores firmantes, otorgamos nuestra autorización para que el estudiante imprima su trabajo final de tesis, y continúe con los trámites necesarios para la obtención del grado de doctorado respectivo.

ATENTAMENTE

"AMOR, ORDEN Y PROGRESO"

Tulancingo de Bravo, Hidalgo a 25 de noviembre de 2021

Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna

Dr. Ramón Razo Zárate

Dr. Joel Meza Rangel

Dr. Marcos Jiménez Casas

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por la oportunidad de realizar mis estudios de Doctorado, en especial al programa de Ciencias Agropecuarias por la formación profesional que recibí.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca recibida para realizar mis estudios.

Al fondo sectorial para la investigación, el desarrollo y la innovación tecnológica forestal CONACYT-CONAFOR, que financió el proyecto “Establecimiento de huertos semilleros asexuales regionales y ensayos de progenie de *Pinus patula* para la evaluación genética de los progenitores”, a partir del cual se derivó la presente investigación.

Al Dr. Jesús Vargas Hernández y al Dr. Javier López Upton del Colegio de Postgraduados por la oportunidad de tomar el curso de Mejoramiento Genético Forestal.

Al Dr. Javier López Upton por la asesoría en la estimación de los parámetros genéticos.

A los integrantes del comité asesor, en especial al Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna por su tiempo y sugerencias para llevar a cabo el presente trabajo.

RESUMEN

Pinus patula es una especie de amplio uso en México por sus características de crecimiento y calidad de madera. Con el propósito de aumentar la productividad forestal se inició un programa de mejora genética para esta especie. Los objetivos de este trabajo fueron: a) determinar las diferencias entre poblaciones en características de semillas y crecimiento, así como en la fenología del brote terminal; b) identificar algún patrón de variación relacionado con características geográfico-ambientales, de ocho poblaciones de *P. patula* de Hidalgo, Puebla y Veracruz; y c) estimar parámetros genéticos en un ensayo de progenie localizado en dos sitios.

Se colectó semilla de 64 árboles, se sembró en contenedores de polietileno en vivero; posteriormente, las plantas se establecieron en dos sitios, con un diseño de bloques completos al azar en Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo. (1993 msnm) y Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. (2312 msnm). En vivero, la emergencia de las semillas varió entre 54.2 a 88.3 %, la velocidad de emergencia de 35.5 a 45.3 días, la altura de 25.8 a 27.9 cm y el diámetro de 3.4 a 3.6 mm. Las semillas que provienen de más altitud tienen mayor porcentaje y velocidad de emergencia que las que proceden de sitios de menor elevación.

En campo, se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre y dentro de sitios. En Tlatoxca las plantas fueron más altas y de mayor diámetro. La interacción sitio x procedencia fue significativa ($p < 0.05$). El porcentaje de variación genética entre poblaciones varió de 0 a 3 %, con los mayores valores en Ojo de Agua. A los 23 meses de edad, Tierra Blanca fue la procedencia más sobresaliente en crecimiento en los dos sitios. En Tlatoxca, las plantas que proceden de sitios más cálidos y húmedos

mostraron mayor crecimiento en altura en comparación con las plantas que provienen de sitios más fríos y secos.

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre y dentro de sitios en la fecha de inicio del crecimiento y en el desarrollo del brote terminal. En Tlatoxca el crecimiento comenzó a los 65 días julianos, mientras que en Ojo de Agua en el día 70. La diferencia entre la procedencia más temprana (Tierra Blanca) y más tardía (La Selva) fue de 7.9 días en Ojo de Agua; mientras en Tlatoxca, la diferencia fue de 3.1 días para las poblaciones de Xonocuatla y La Selva. En Ojo de Agua, las plantas de El Reparó y La Selva mostraron menor cantidad de plantas con desarrollo avanzado del brote; mientras que en Tlatoxca no se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$). Las poblaciones no mostraron un patrón de variación definido entre las variables fenológicas y los factores geográfico-ambientales del sitio de origen.

Por otra parte, la heredabilidad individual de las características de crecimiento fue moderada en Ojo de Agua y baja en Tlatoxca. La heredabilidad de familias fue mayor en Ojo de Agua para las tres características. La heredabilidad de familias fue mayor que la heredabilidad individual. La altura fue la característica menos afectada por el ambiente de plantación ($r_B = 0.55$). El diámetro ($r_B = 0.0$) y el número de verticilos ($r_B = 0.41$) mostraron ser características inestables entre los sitios. En Ojo de Agua, las familias que provienen de sitios de mayor elevación mostraron mayor crecimiento en diámetro.

Palabras clave: mejora genética, ensayos de progenie, variación genética, parámetros genéticos, heredabilidad.

ABSTRACT

Pinus patula is a species widely used and important in Mexico due to its growth characteristics and wood quality. In order to increase forest productivity, a genetic improvement program for this species was started. The objectives of this work were: a) to recognize if there are differences between and within populations in seed and growth characteristics, as well as in the phenology of the terminal shoot; also identify some pattern of variation related to geographic-environmental characteristics of eight populations of *P. patula* from Hidalgo, Puebla and Veracruz. b) estimate genetic parameters in a two-site progeny assay.

Seed was collected from 64 trees and sown in polyethylene containers in the nursery; later, the plants were established in two trials, with a randomized complete block design in Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo. (1993 m) and Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. (2312 m). The emergence varied between populations from 54.2 to 88.3%, the emergence speed from 35.5 to 45.3 days, the height from 25.8 to 27.9 cm and the diameter from 3.4 to 3.6 mm. Plants from higher altitude populations have a higher percentage and speed of emergence than those from lower elevations. A differentiation pattern was not found with respect to altitude in the nursery growth characteristics. In the field, significant differences ($p < 0.05$) were found between sites and between provenances. In Tlatoxca plants showed greater growth. The site x provenance interaction was significant ($p < 0.05$) for the growth variables. The percentage of genetic variation between populations varied from 0 to 3%, with the highest values in Ojo de Agua.

At 23 months of age, Tierra Blanca is the most outstanding growing provenance at the two sites. In Tlatoxca, the plants that come from warmer and more humid places showed greater growth in height compared to the plants that come from colder and drier places. Statistical differences ($p \leq 0.05$) were found between and within sites at the date of initiation of growth and in the development of the terminal shoot. In Tlatoxca, growth began at 65 Julian days, while in Ojo de Agua at day 70. The difference between the earliest provenance (Tierra Blanca) and the latest (La Selva) was 7.9 days at Ojo de Agua; While in Tlatoxca, the difference was 3.1 days for the populations of Xonocuatla and La Selva. In Ojo de Agua, the plants from El Reparó and La Selva showed fewer plants with advanced shoot development; while in Tlatoxca no statistical differences were found ($p \leq 0.05$). The populations did not show a defined pattern of variation between the phenological variables and the geographic-environmental factors of the place of origin. Regarding the genetic parameters, the individual heritability of the growth characteristics was moderate in Ojo de Agua and low in Tlatoxca. The heritability of families was higher in Ojo de Agua for the three characteristics. Family heritability was higher than individual heritability. Height was the characteristic least affected by the plantation environment ($r_B = 0.55$). The diameter ($r_B = 0.0$) and the number of whorls ($r_B = 0.41$) showed to be unstable characteristics between the sites. In Ojo de Agua, families that come from mother trees located at higher elevation sites showed greater growth in diameter.

Key words: genetic improvement, progeny trials, genetic variation, genetic parameters, heritability.

ÍNDICE

RESUMEN	ii
ABSTRACT	iv
Capítulo I.Introducción general.....	1
1.1. Marco teórico	4
1.1.1. Descripción taxonómica de la especie.....	4
1.1.2. Distribución natural y antecedentes del manejo genético de la especie	4
1.1.3. Variación genética y su importancia	5
1.1.4. Variación geográfica	7
1.1.5. Mejoramiento genético y ensayos de progenie	8
1.1.6. Parámetros genéticos.....	9
1.1.7. Características fisiográfico-ambientales de la región de estudio	11
1.2. Objetivo general	13
1.3. Justificación.....	13
1.4. Literatura citada	14
Capítulo II.Variación genética y geográfica en características de emergencia y crecimiento inicial en poblaciones de <i>Pinus patula</i> en vivero	
Resumen.....	20
Abstract.....	21
2.1. Introducción.....	22
2.2. Objetivos	23
2.3. Hipótesis	23
2.4. Materiales y métodos	24
2.5. Resultados y discusión.....	28
2.6. Conclusiones.....	38
2.7. Recomendaciones.....	39
2.8. Literatura citada	40
Capítulo III.Variación en el crecimiento de árboles de <i>Pinus patula</i> de diferentes procedencias establecidas en campo	47

Resumen.....	47
Abstract.....	48
3.1. Introducción.....	49
3.2. Objetivo.....	50
3.3. Hipótesis.....	50
3.4. Metodología.....	51
3.5. Resultados y discusión.....	54
3.6. Conclusiones.....	64
3.7. Recomendaciones.....	64
3.8. Literatura citada.....	65
CAPITULO IV.Fenología del brote terminal de poblaciones de <i>Pinus patula</i>	69
Resumen.....	69
Abstract.....	70
4.1. Introducción.....	71
4.2. Objetivo.....	72
4.3. Hipótesis.....	72
4.4. Metodología.....	73
4.5. Resultados y discusión.....	76
4.6. Conclusiones.....	81
4.7. Recomendaciones.....	81
4.8. Literatura citada.....	81
CAPITULO V.Parámetros genéticos en dos ensayos de progenie de <i>Pinus patula</i>	85
Resumen.....	85
Abstract.....	86
5.1. Introducción.....	87
5.2. Objetivos.....	88
5.3. Hipótesis.....	89
5.4. Metodología.....	89
5.5. Resultados y discusión.....	95
5.6. Conclusiones.....	102
5.7. Recomendaciones.....	103

5.8. Literatura citada	103
CAPÍTULO VI. Conclusiones y recomendaciones generales	106

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro II-1. Localidades y número de árboles de <i>Pinus patula</i> seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.	25
Cuadro II-2. Valores medios de altura ($\pm 1ES$) en plantas de siete poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la región centro de su distribución natural.	33
Cuadro II-3. Valores medios de diámetro ($\pm 1ES$) en plantas de poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la región centro de su distribución natural.	34
Cuadro II-4. Componentes de la varianza para características de germinación, altura y diámetro de plántulas de <i>Pinus patula</i> de poblaciones del centro de su distribución natural.....	35
Cuadro II-5. Coeficiente de correlación de Pearson para peso de semilla con características de emergencia y crecimiento inicial.....	36
Cuadro III-1. Localidades y número de árboles de <i>Pinus patula</i> seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.....	52
Cuadro III-2. Valor medio ($\pm 1ES$) de las variables de crecimiento y supervivencia de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la región centro de su distribución en dos sitios de plantación	55
Cuadro III-3. Valor medio ($\pm 1ES$) de altura y diámetro de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo.	56
Cuadro III-4. Valor medio ($\pm 1ES$) de altura y diámetro de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.....	58

Cuadro III-5. Supervivencia promedio de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de plantación.....	59
Cuadro III-6. Relación de altura y diámetro con variables climáticas del sitio de origen de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i>	62
Cuadro IV-1. Localidades y número de árboles de <i>Pinus patula</i> seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.....	74
Cuadro IV-2. Número de días para iniciar el crecimiento en plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de evaluación.....	77
Cuadro IV-3. Relación del porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote con las características del sitio de origen de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de plantación.....	80
Cuadro IV-4. Relación del porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote con las características del sitio de origen de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de plantación.....	80
Cuadro V-1. Localidad y número de familias de <i>Pinus patula</i> que se evaluaron en los ensayos de progenie.....	91
Cuadro V-3. Heredabilidad y coeficiente de variación en características de crecimiento de <i>Pinus patula</i> en dos sitios.....	96
Cuadro V-4. Correlaciones genéticas (bajo la diagonal) y fenotípicas (sobre la diagonal) de las características de crecimiento en Ojo de Agua (izquierda) y Tlatoxca (derecha)	97
Cuadro V-5. Componentes de varianza y correlación genética tipo B para familias de <i>Pinus patula</i>	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Peso promedio de cien semillas (± 1 ES) en siete poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la zona centro de su distribución natural. Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas, Tukey ($p \leq 0.05$)	29
Figura 2-2. Curva de emergencia acumulada (± 1 ES) de semillas de siete poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la zona centro de su distribución	30
Figura 2-3. Porcentaje y tiempo de emergencia promedio (± 1 ES) en poblaciones de <i>Pinus patula</i> . Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas. Tukey, ($p \leq 0.05$).....	32
Figura 2-4. Relación del porcentaje y tiempo medio de emergencia con la altitud de origen de siete poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la zona centro de su distribución.....	36
Figura 3-1. Crecimiento medio en altura de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de evaluación a 15 meses de establecimiento en campo	60
Figura 3-2. Crecimiento promedio en diámetro de plantas de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> en dos sitios de evaluación a 15 meses de establecimiento en campo.....	61
Figura 3-3. Relación de la altura de las plantas con la precipitación y temperatura de los sitios de origen de ocho poblaciones de <i>Pinus patula</i> de la región centro de su distribución.....	62

Figura 4-1. Porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote en ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de plantación. Tukey, ($p \leq 0.05$)79

Figura 5-1. Relación entre el crecimiento promedio en altura y la contribución relativa a la varianza de la IGA en un ensayo de progenie de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación.....99

Figura 5-2. Relación entre el crecimiento promedio en diámetro y la contribución relativa a la varianza de la IGA en un ensayo de progenie de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación.....100

Figura 5-3. Cambio en el valor de la correlación r_B al eliminar el 10 % de las familias más interactivas para la altura y diámetro en un ensayo de progenies de *Pinus patula*101

Figura 5-4. Relación del crecimiento en diámetro con la altitud de origen de la progenie de 64 familias de *Pinus patula* en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver..... 102

Capítulo I.

Introducción general

En México se tiene un déficit en la balanza comercial de productos forestales. La producción nacional de madera es de 9 millones de m³; mientras que, la demanda nacional es de alrededor de 27.3 millones de m³, es decir, se importa alrededor del 70 % de la madera que se consume (SEMARNAT, 2017). Otro aspecto a considerar es que el 90 % de la madera que se aprovecha en el país, se extrae de bosques naturales. Sin embargo, la productividad de los bosques es variable y en algunos casos baja, debido en parte, a que en décadas pasadas el aprovechamiento de los bosques estuvo concesionado a empresas que ejercieron la selección disgénica (aprovecharon los árboles más altos y de mayor diámetro) por lo que la composición genética de los bosques se fue deteriorando (Medina-Pérez y Segura-Warnholtz, 2007; CONAFOR, 2019).

Aunado a lo anterior, factores antropogénicos como la tala clandestina, los incendios, las plagas, el cambio de uso de suelo, entre otros han repercutido en la degradación de los bosques y en la reducción del área forestal. Es por ello, que desde hace aproximadamente 20 años aumentó el interés por establecer plantaciones comerciales que permitan abastecer la demanda de productos forestales y también plantaciones con fines de restauración con la finalidad de recuperar sitios de vocación forestal (CONAFOR, 2019).

El establecimiento de plantaciones requiere de germoplasma de calidad y procedencias adecuadas, con la finalidad de aumentar la productividad y la adaptación de los árboles al sitio de plantación (White *et al.*, 2007). Sin embargo, en el país no se cuenta con un

abasto suficiente de semilla de calidad que permita satisfacer dicha demanda (Flores *et al.*, 2014). Para las especies forestales, la opción más recomendable para la obtención de semilla de calidad son los huertos semilleros. Para establecer huertos se requiere de semilla de individuos sobresalientes (seleccionados en poblaciones naturales), se reproducen en vivero y por último estos árboles se establecen en plantaciones conocidas como ensayos de progenie.

La finalidad de los ensayos de progenie, a largo plazo, es valorar a los progenitores con base en la respuesta de su descendencia (White *et al.*, 2007) y son evaluados por lo menos hasta la mitad del turno comercial, que para el caso de *Pinus patula* son diez años. Evaluar dichas plantaciones a diferentes edades permite estimar parámetros de gran utilidad para la toma de decisiones en un programa de mejora genética como la interacción genotipo-ambiente, parámetros genéticos, variación geográfica, entre otros.

Cuando los ensayos de progenie se establecen en varias localidades se genera un comportamiento diferencial entre las progenies de diferentes árboles, según el ambiente particular, conocido como interacción genotipo-ambiente (White *et al.*, 2007). La finalidad es encontrar genotipos estables que funcionen bien en diferentes ambientes para garantizar un rendimiento mínimo en cada sitio o encontrar genotipos específicos para cada ambiente (Kanzler, 2003).

Dado que mantener los ensayos de progenie resulta costoso se recurre a la selección temprana (Flores *et al.*, 2014) que consiste en evaluar parámetros de interés a temprana edad, los cuales son correlacionados con otras características medidas en edad adulta; sí existe una fuerte correlación de los caracteres en etapa juvenil con un carácter de

interés económico a la edad madura, se podría seleccionar a los mejores individuos desde los primeros años de desarrollo (Adams *et al.*, 2001). Además de la correlación, para cada carácter evaluado se requiere estimar la heredabilidad a nivel individual y de familia. En conjunto estos parámetros sirven para definir si la selección temprana es factible. Las especies forestales son longevas por lo que la selección temprana es deseable ya que permitiría reducir el tiempo necesario para el mejoramiento genético (Pagliarini *et al.*, 2016).

Es posible evaluar la variación geográfica en los ensayos de progenie. Las especies de amplia distribución se desarrollan bajo diferentes condiciones ambientales por lo que las poblaciones tienden a diferenciarse genéticamente, en respuesta a la presión de selección de gradientes de temperatura y precipitación (Rehfeldt *et al.*, 2002).

Si se identifica un patrón de variación se recomienda definir lineamientos para orientar el movimiento de germoplasma en los programas de reforestación, con la finalidad de mantener un acoplamiento adaptativo entre genotipos y ambientes. Lo anterior, es de suma importancia porque, aunque se han hecho esfuerzos importantes en el país en cuanto a proyectos de reforestación, se reconoce que la supervivencia es menor al 50 %, como consecuencia, en parte a la falta de dicho acoplamiento (Sáenz-Romero y Lindig-Cisneros, 2004; CONAFOR, 2019). Además, la investigación a nivel de procedencias debe ser prioritario desde el comienzo de un programa de mejora genética (Flores-López *et al.*, 2014).

1.1. Marco teórico

1.1.1. Descripción taxonómica de la especie

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. es un árbol de corteza gruesa y escamosa de coloración café rojiza. Las hojas están unidas en grupos de 3, 4 o rara vez 5 en cada fascículo, miden de 15 a 30 cm de largo, colgantes de color verde brillante. La vaina es persistente, de 10 a 15 mm de largo. Los conos son largamente cónicos, de 7 a 12 cm de largo, sésiles, algo encorvados, color amarillo ocre con tinte rojizo lustroso o café amarillento cuando maduran son tenazmente persistentes, seróticos y generalmente en grupos de 3 a 8 frutos (Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Las escamas son duras con el ápice redondeado, tienen umbo deprimido con una punta oscura muy pequeña. La semilla es ovoide casi triangular, de color grisáceo, de 4 a 6 mm de largo por 2-4 mm de ancho, ala articulada de 8 a 12 mm de largo por 5-8 mm de ancho, de color café claro. La madera es suave, de color claro ligeramente amarillento, con vetas moreno pálidas, fácil de trabajar y poco resinosa. Es un árbol de 10 a 40 m de altura y diámetro normal de 50 a 90 cm, con fuste recto (Perry, 1991; Dvorak *et al.*, 2000).

1.1.2. Distribución natural y antecedentes del manejo genético de la especie

P. patula es una conífera nativa de México, con amplia distribución en la Sierra Madre Oriental, principalmente en los estados de Hidalgo, Veracruz, Puebla, Oaxaca y Tlaxcala, a través de un extenso gradiente altitudinal que va de los 1600 a 3100 msnm. Se considera una especie templada-subtropical que se desarrolla en ambientes forestales nubosos, de alta precipitación y en suelos profundos y bien drenados. *P. patula* es una de las especies forestales con mayor velocidad de crecimiento, de fuste recto y madera

de excelente calidad. Forma masas puras, aunque también se asocia con algunas especies como *Pinus pseudostrobus* Lindl., *Pinus teocote* Schltdl. et Cham. entre otras (Perry, 1991; Dvorak *et al.*, 2000; Nyoka, 2002). Por sus buenas características y potencial productivo se reconoce como una especie prioritaria en México para implementar programas de mejora genética (FAO, 2011).

Desde principios del siglo XX esta especie fue apreciada y llevada a otros países para el establecimiento de plantaciones comerciales en varias partes del mundo en donde ha tenido éxito, sobre todo para producción de material celulósico y de aserrío (Nyoka, 2002). Por ejemplo, en Sudáfrica fue introducida en 1907 en donde creció de manera sobresaliente y se inició un extenso programa de mejoramiento genético y plantaciones comerciales. A través de la cooperativa CAMCORE de Estados Unidos, a inicios de los años 90 se colectó semilla en alrededor de 500 árboles seleccionados en rodales naturales de México para establecer ensayos de progenie en Brasil, Colombia, Chile, Sudáfrica y Zimbabwe (Mitchell *et al.*, 2012).

En México se inició el mejoramiento genético de esta especie alrededor de los años 90. A la fecha existen 12 huertos semilleros, principalmente de primera generación, los cuales aún no producen semilla genéticamente mejorada para uso en plantaciones comerciales (FAO, 2011).

1.1.3. Variación genética y su importancia

La variación genética es la base de la evolución y permite que las especies se adapten a los cambios del medio ambiente (Hamilton, 2009). La estructura genética se puede definir como la forma en que está organizada la variación entre los individuos dentro y

entre las poblaciones (Clair and Jhonson, 2004). La magnitud y los patrones de variación genética son el resultado de las fuerzas evolutivas que actúan sobre las especies. Estas fuerzas son la mutación, migración, flujo genético, deriva génica y selección. La selección puede diferenciar u homogeneizar poblaciones. Si las poblaciones se encuentran en ambientes diferentes, van a diferenciarse, y si están en ambientes muy parecidos, la selección puede actuar para homogeneizarlas (Furnier, 2004).

Es sabido que en especies arbóreas como los pinos, que son de amplia distribución, longevas, de polinización cruzada por el viento y con alta fecundidad presentan generalmente mayores niveles de variación dentro de las poblaciones que entre ellas. De ahí que la mejora genética de estas especies se lleve a cabo a través de la selección de familias (Zobel y Talbert, 1988).

Para el estudio de la variación genética en especies forestales algunos de los métodos son: (Furnier, 2004):

- a) Marcadores moleculares: es un método que considera extraer ADN de las plantas de interés e identificar el polimorfismo presente en las secuencias de ADN. Existen diferentes tipos de marcadores.
- b) Estudios de ambiente común: es uno de los métodos más utilizado para medir variación genética en las especies forestales. Implica poner a crecer plantas de diferentes genotipos en un ambiente común. Partiendo del hecho de que el fenotipo está en función del genotipo, el ambiente y la interacción de éstos. Lo que se busca es que todos los genotipos experimenten el mismo ambiente y por lo tanto cualquier diferencia que vemos

entre las plantas se debe sólo a diferencias en el genotipo. Aquí se incluyen estudios en vivero, ensayos de progenie y estudios de jardín común.

1.1.4. Variación geográfica

Las características geográficas comprenden la altitud, la latitud y la longitud del sitio donde se colectó el material vegetal. Estas variables se han utilizado como medida indirecta de las condiciones climáticas de los sitios porque generalmente se carece de estaciones meteorológicas en los bosques. La altitud se ha utilizado como medida indirecta de la temperatura, ya que es sabido que conforme esta aumenta, la temperatura disminuye (Rehfeldt *et al.*, 2014); esta característica se ha relacionado con la variación genética en diferentes especies de coníferas (Ye y Syayawickrama, 2014).

Si la variación genética se relaciona con alguna de las características geográficas o climáticas del sitio de origen se dice entonces que existe variación geográfica, también llamada *variación adaptativa*. Conocer la variación geográfica es el primer paso en la investigación genética y/o domesticación de cualquier especie forestal porque permite (White *et al.*, 2007): a) conocer la importancia de fuerzas evolutivas como la selección, migración o deriva génica que causan los patrones observados, b) apoyar la toma de decisiones acerca del movimiento de germoplasma en los programas de reforestación, c) decidir qué fuentes de semilla darán mayor rendimiento por región y d) obtener información útil para la formulación de estrategias de conservación de recursos genéticos.

Las poblaciones de especies de coníferas se diferencian genéticamente de acuerdo a gradientes geográficos, como respuesta a la presión de selección de variables

ambientales. La diferenciación ocurre en variables de crecimiento, resistencia a heladas, fenología del brote, germinación, entre otras. La idea general es “condiciones ecológicas similares conducen a constituciones genéticas similares” (Conkle, 2004).

En México es escasa la información sobre los patrones de variación geográfica de las especies forestales y son pocas las especies que se han estudiado. Ante la falta de esta información, para la asignación de especies y procedencias en los programas de reforestación se han hecho algunas propuestas de zonificación “provisional” basados sobre todo en información climática, topográfica, edáfica y de vegetación natural (Sáenz-Romero, 2004).

Para *P. patula* se tienen algunos avances en cuanto al conocimiento de la variación geográfica. En plantas de seis y diez meses de edad de diferentes procedencias de Ixtlán, Oaxaca no se encontró un patrón definido entre las características de crecimiento y la altitud del sitio de origen (Sáenz-Romero *et al.*, 2011). Estas poblaciones fueron evaluadas en campo a los 18 meses por Ruíz *et al.* (2014) y encontraron un patrón definido de diferenciación respecto a la altitud, en el que las poblaciones de altitud intermedia mostraron mayor desarrollo en altura que las poblaciones de los extremos altitudinales (Sáenz-Romero, 2011).

1.1.5. Mejoramiento genético y ensayos de progenie

Existe amplia gama de métodos de mejoramiento genético, sin embargo, los que han demostrado ser efectivos y económicos son la selección y cruzamiento de árboles selectos (White *et al.*, 2007). La selección de árboles superiores con base en su apariencia externa, es el inicio y la base fundamental de un programa de mejoramiento

genético forestal. La calidad y rigurosidad con que se realiza la selección de estos árboles es determinante en la ganancia genética que se alcanza para un carácter determinado (Zobel y Talbert, 1988).

Al hacer la selección de fenotipos sobresalientes, existe la posibilidad de que la superioridad observada en estos árboles no se deba a causas genéticas, sino a diferencias ambientales. Una de las formas de asegurar que las características fenotípicas observadas se deben a factores genéticos es evaluando el comportamiento de la progenie (ensayos de progenie), en condiciones ambientales similares. Esta fase del programa de mejoramiento genético se conoce como evaluación genética del material, y es indispensable para asegurar el éxito de la selección fenotípica (Vargas-Hernández y López-Upton, 2004).

Además de estimar el valor genético de los individuos, la etapa de evaluación genera la información genética básica necesaria para diseñar la estrategia de selección y manejo de las poblaciones de producción de germoplasma (huerto semilleros) y los materiales indispensables para los ciclos de selección en las generaciones siguientes del programa de mejoramiento genético (Flores-López *et al.*, 2014).

1.1.6. Parámetros genéticos

Heredabilidad

La heredabilidad es la medida del grado en el cual un carácter imprime la influencia de la herencia en comparación con el ambiente y se expresa como la proporción entre la varianza genética y la fenotípica. Una de las formas de conocer la heredabilidad es a través del análisis de la progenie, estimando la varianza fenotípica y subdividiéndola en

sus distintos componentes, a partir de las diferencias entre y dentro de progenies o familias. Es indispensable conocer exactamente el grado de parentesco existente entre el material evaluado. Los valores teóricos de heredabilidad van de 0 (nulo control genético) a 1 (control genético total) (Falconer y Mackay, 1996).

Los valores de heredabilidad mayor de 0.5 se considera alta; entre 0.20 y 0.50 se considera moderada, mientras que valores menores de 0.20 indican baja heredabilidad (Stanfield, 1971).

Correlaciones genotípicas y fenotípicas

Dentro de un mismo taxón se pueden encontrar grandes diferencias de comportamiento respecto al lugar de procedencia. Este fenómeno inicia desde el momento de la germinación, lo que implica que se pueda realizar una selección temprana de los mejores individuos de los mejores orígenes, si esta característica está relacionada con alguna otra a edad madura o es una característica que sea útil en la sobrevivencia de las plantas a edad temprana (Adams *et al.*, 2001).

En ensayos establecidos con *P. patula* en Zimbabwe, se encontraron fuertes correlaciones juveniles-maduras entre los rasgos medidos en el vivero y las características medidas en el campo a los 8 años de edad. Las plántulas grandes con pocos cotiledones en el vivero se convirtieron en árboles grandes con alta densidad de madera en el campo y las familias con pocas ramas y altura superior en el segundo año desarrollaron árboles con alta densidad de madera y gran volumen al octavo año (Barnes *et al.*, 1992).

Interacción genotipo-ambiente

La interacción genotipo-ambiente se produce cuando el rendimiento relativo de los genotipos difiere cuando una planta se cultiva en diferentes entornos (Zobel y Talbert, 1988). El rango de distribución de *P. patula* incluye áreas con grandes diferencias en altitud, régimen de temperatura y precipitación. Estas grandes diferencias entre sitios sugieren que puede existir interacción genotipo-ambiente (GxE). Si la interacción genotipo-ambiente se presume como no significativa, basta ensayar en un solo sitio. En cambio, si la interacción se predice significativa y elevada, hay dos posibilidades: (a) ensayar pocos árboles en muchos sitios, si se desea un árbol de amplio espectro de adaptación, o (b) ensayar muchos árboles en pocos sitios, si se desea árboles adaptados a sitios específicos (White *et al.*, 2007).

Uno de los métodos más utilizados para estudiar esta interacción es la correlación genética tipo B (r_B) que estima la correlación existente para una determinada característica entre cada par de ambientes (Yamada, 1962). Los valores de r_B varían de 0 a 1. Entre más cercana a 1 indica que la expresión de la característica es similar en un determinado par de ambientes. Si el valor se acerca a 0, los genotipos se ven afectados de manera significativa (White *et al.*, 2007).

1.1.7. Características fisiográfico-ambientales de la región de estudio

La región de estudio está comprendida dentro de la Sierra Madre Oriental, en esta región predominan rocas sedimentarias de origen marino y continental. El clima predominante es el templado húmedo con lluvias en verano. En el presente trabajo se

evaluaron cuatro poblaciones que pertenecen a Hidalgo (Cumbre, Tierra Blanca, Cruz Verde y El Reparo), dos de Veracruz (Ojo de Agua y La Selva) y dos que pertenecen a Puebla (Tlatlauquitepec y Beristain). Las poblaciones que se encuentran en Hidalgo y Veracruz están dentro de la misma cuenca de abasto, por lo que se puede inferir que existe flujo genético entre las poblaciones. En esta zona se encuentran diferentes tipos de vegetación, desde el matorral espinoso, al suroeste, pasando por bosques templados fríos, bosques mesófilos de montaña hasta selva baja al noreste. Debido a la abundancia y tasa de crecimiento de *P. patula*, es la especie maderable más importante en la región. El ecosistema donde habita la especie es el bosque templado húmedo con lluvias en verano (CONAFOR, 2014).

La población de Beristain, Puebla, pertenecen a la región de Chignahuapan-Zacatlán. Esta región alberga también diferentes ecosistemas desde bosque mesófilo de montaña, bosque de pino, bosque de encino, bosque de galería y matorrales desérticos. En esta región el bosque de pino ocupa las partes más altas de la cuenca, en altitudes superiores a los 2200 m, siendo Chignahuapan el municipio con mayor cantidad de superficie con este tipo de vegetación.

Tlatlauquitepec se ubica dentro de la región Teziutlán, Puebla, que contiene también diferentes ecosistemas como el bosque de oyamel, bosque de pino-encino, bosque de pino, bosque mesófilo de montaña y matorral desértico. Los pinos no son el tipo de vegetación predominante en la zona y generalmente están asociados con otras especies. En esta región el bosque de pino se localiza en elevaciones por encima de los 2400 m. El clima predominante es templado subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura

entre 14 y 20 °C, con precipitación entre 700 y 1 500 mm. *P. patula* crece en exposición este-noreste en sitios con mayor humedad y temperatura.

1.2. Objetivo general

Evaluar la variación genética intraespecífica de *P. patula* (en vivero y en campo) en características de valor adaptativo en un ensayo de progenies, así como relacionar dicha variación con características geográfico-ambientales del sitio de origen de las poblaciones para determinar si existe algún patrón de variación geográfica; así como estimar parámetros genéticos de las características de crecimiento para que puedan utilizarse en etapas posteriores con fines de selección temprana.

1.3. Justificación

Uno de los primeros pasos al iniciar un programa de mejoramiento genético es conocer los patrones de variación intraespecífica, lo que permite mejorar la toma de decisiones. Por lo anterior, se estudian las procedencias que se integraron al programa de mejora, ya que existe escasa información acerca de la variación genética de las poblaciones de *P. patula* ubicadas en la región centro de su distribución. Además, evaluar características a temprana edad abre la posibilidad de reducir el ciclo de mejora lo que es bastante deseable para las especies forestales y/o reducir los costos del programa.

1.4. Literatura citada

- Adams T. W., S. N. Aitken, D. G. Joyce, G. T. Howe and J. Vargas-Hernández (2001) Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal douglas fir. *Silvae Genetica* 50: 167-175.
- Barnes D. R., L. J. Mullin and G. Batle (1992). Genetic control of fifth year traits in *Pinus patula* Schiede and Deppe. *Silvae Genetica*, 41: 242-248.
- Clair S. B. and R. Johnson (2004) Structure of Genetic Variation and Implications for the Management of Seed and Planting Stock. In Riley L. E., K. R. Dumroese, T. D. Landis. Coords. National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations. Fort Collins, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 33 p.
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2019) El sector forestal mexicano en cifras. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/el-sector-forestal-mexicano-en-cifras-2019> (mayo 2020).
- CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2014) Estudio diagnóstico de la cuenca de abasto de materias primas y productos forestales “Huayacocotla, Ver. Zacualtipán, Hgo.”. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/estudios-sobre-cuencas-de-abasto-forestal> (junio, 2020).
- Dvorak W. S., G. Hodge, J. Kietzka, F. Malan, L. Osorio and T. Stanger (2000) *Pinus patula*. In: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. Raleigh: College of Natural Resources, North Carolina State University. pp 148–173.

Falconer D. S. and T. F. Mackay (1996) Introduction to quantitative genetics. 4th. ed. Longman Exxex, UK. 464 p.

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2011) Situación de los recursos genéticos forestales en México. Roma, Italia. https://coin.fao.org/coin-static/cms/media/11/13310714832850/informe_rgf (marzo 2020).

Farjón A. and Styles B. T. (1997) Flora Neotrópica Monograph 75 *Pinus* (Pinaceae). New York Botanical Garden. 291 p.

Flores C., J. López U. y S. Valencia M. (2014) Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Comisión Nacional Forestal. Jalisco, México. 152 p.

Furnier G. R. (2004) Métodos para medir variación genética en las plantas. In: Manejo de Recursos Genéticos Forestales. 2a edición. J. J. Vargas H., B. Bermejo V. y F. T. Ledig (eds.). Colegio de Postgraduados, Comisión Nacional Forestal. Montecillo, Edo. de México y Zapopan, Jalisco, México. pp: 20-30.

Hamilton M. (2009) Population genetics. Hawiley-Blackwell. USA. 407 p.

Kanzler A, S. Hagedorn, G. Hodge G. and W. Dvorak (2003) Genotype by environment interaction for volume growth at 6 years of age in a series of five *Pinus patula* progeny trials in southern Africa. *Southern African Forestry Journal* 198: 3–15.

- Medina-Pérez L. y G. Segura-Warnholtz (2007) Las políticas forestales y de conservación y sus impactos en las comunidades forestales en México. In Los bosques comunitarios de México. D. Bray, L. Merino y D. Barry eds. Pag 77-98.
- Mitchell R. G., T. A. Coutinho, E. Steenkamp, M. Herbert and M. J. Wingfield (2012) Future outlook for *Pinus patula* in South Africa in the presence of the pitch canker fungus (*Fusarium circinatum*). *Southern Forests* 74: 203–210, <http://dx.doi.org/10.2989/20702620.2012.741792>
- Nyoka B. I. (2002) *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. In: CAB International (comp). Pines of Silvicultural Importance. London, UK. CABI Publishing. p. 303-316.
- Pagliarini K. M., W. S. Kieras, J. P. Moreira, V. A. Sousa, J. Y. Shimizu, M. L. T. Morales, E. Furlani Jr. and A. V. Aguiar (2016) Adaptability, stability, productivity and genetic parameters in slash pine second generation families in early age. *Silvae Genetica* 65: 71-82.
- Perry J. P. (1991) The pines of México and Central America. Timber Press, Inc. Portland, Oregon. USA. 231 p.
- Rehfeldt G. E., M. N. Tchebakova, I. Y. Parfenova, R. W. Wykoff, A. N. Kuzmina and I. L. Milyutin (2002) Intraspecific responses to climate in *Pinus sylvestris*. *Global Change Biology* 8: 912–929, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00516.x>
- Rehfeldt G. E., L. Leytes, C. Sáenz-Romero (2014) Comparative genetic responses to climate in the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga mensiezii*. *Forest*

ecology and management 324: 138-146,
<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.041> 0

Ruíz-Talonia F. L., N. M. Sánchez-Vargas, J. S. Bayuelo-Jiménez, S. I. Lara-Cabrera and C. Sáenz-Romero (2014) Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula* provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change. *Silvae Genetica* 63: 139-149, <https://doi.org/10.1515/sg-2014-0019>

Sáenz-Romero C. y R. Lindig-Cisneros (2004) Evaluación y propuestas para el programa de reforestación en Michoacán, México. *Ciencia Nicolaita* 37:107-122. https://www.researchgate.net/publication/291785913_Evaluacion_y_propuestas_para_el_programa_de_reforestacion_en_Michoacan_Mexico (Consultado: abril 2020).

Sáenz-Romero C. (2011) Guía para mover altitudinalmente semillas y plantas de *Pinus oocarpa*, *P. devoniana* (= *P. michoacana*), *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. hartwegii* para restauración ecológica, conservación, plantaciones comerciales y adaptación al cambio climático. Versión 4.0., Grupo de Trabajo sobre Recursos Genéticos, Comisión Forestal de América del Norte. https://www.fs.fed.us/global/nafc/genetics/2009/SaenzRomero_2011_GuiaAltitudinal_v04.pdf. (marzo, 2020).

Sáenz-Romero C., L. Ruiz-Talonia, J. Beaulieu, N. Sánchez-Vargas, G. Rehfeldt (2011) Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34:19-25.

Sáenz-Romero C. (2004) Zonificación estatal y altitudinal para la colecta y movimiento de semillas de coníferas en México. In: Manejo de Recursos Genéticos Forestales. 2a edición. J. J. Vargas H., B. Bermejo V. y F. T. Ledig (eds.). Colegio de Postgraduados, Comisión Nacional Forestal. Montecillo, Edo. de México y Zapopan, Jalisco, México. pp: 65-77.

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2017) Anuario Estadístico Forestal 2017. <https://www.gob.mx/semarnat/documentos/anuarios-estadisticos-forestales> (enero 2020).

Stanfield W.D. (1971). Genética. Teoría y 440 problemas resueltos. Segunda ed. McGraw-Hill, México. 405 p.

Vargas-Hernández J. y J. López-Upton (2004) Diseños genéticos y métodos estadísticos en la evaluación de germoplasma de especies forestales. In: Manejo de Recursos Genéticos Forestales. 2a edición. J. J. Vargas H., B. Bermejo V. y F. T. Ledig (eds.). Colegio de Postgraduados, Comisión Nacional Forestal. Montecillo, Edo. de México y Zapopan, Jalisco, México. pp: 113-127.

White T. L., W. T. Adams and B. D. Neale (2007) Forest Genetics. CAB Int., Oxford. 682 p.

Yamada Y. (1962) Genotype by environment interaction and genetic correlation of the same trait under different environments. *Japan Journal of Genetics* 37: 498-509.

Ye T. S. and K. J. Syayawickrama (2014) Geographic Variation and Local Growth Superiority for Coastal Douglas-fir – Rotation-age Growth Performance in a Douglas-fir Provenance Test. *Silvae Genetica* 63: 116-125.

Zobel B. J. y J. Talbert (1988) Técnicas de mejoramiento de árboles forestales. Limusa, México D. F. 545 p.

Capítulo II.

Variación genética y geográfica en características de emergencia y crecimiento inicial en poblaciones de *Pinus patula* en vivero

Resumen

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. es una especie de amplio uso en México y otros países por sus características de crecimiento y calidad de madera. Con la finalidad de identificar si existe un patrón de variación entre poblaciones de diferente origen altitudinal (1959 a 2579 msnm), se evaluaron, en vivero, características del proceso de emergencia de las semillas, así como altura y diámetro inicial en plántulas de siete poblaciones de Hidalgo, Puebla y Veracruz. Se colectó semilla de 49 árboles y la siembra se realizó en contenedores de polietileno de 310 cm³. La emergencia de las plántulas varió de 54.2 a 88.3 %, la velocidad de emergencia de 35.5 a 45.3 días. A los seis meses, el rango en altura fue de 25.8 a 27.9 cm y el diámetro de 3.4 a 3.6 mm. El peso de la semilla no tuvo relación con la emergencia, pero sí con el crecimiento de las plántulas. Por otro lado, las semillas de poblaciones de mayor altitud mostraron mayor porcentaje y velocidad de emergencia que las que proceden de sitios de menor elevación. Así mismo, no se encontró un patrón de diferenciación del crecimiento en altura y diámetro de las plantas en relación con la altitud del sitio de origen.

Palabras clave: poblaciones, patrón de variación, emergencia de plántulas, elevación.

Abstract

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. is a widely used and very important species in México and other countries due to its growth and wood quality traits. In order to identify the existence of a variation pattern between provenances of different altitudinal origin (1959 to 2579 masl), seed characteristics as well as height and basal diameter at six months of age were evaluated in the nursery in seven populations from the states of Hidalgo, Puebla and Veracruz, Mexico. Seed was collected from 49 mother trees and sown in polyethylene containers of 170 cm³. Seedling emergence varied between populations from 54.2 to 88.3 %, the emergence speed from 35.5 to 45.3 days, seedling height from 25.8 to 27.9 cm and basal diameter from 3.4 to 3.6 mm. The weight of the seed was not related to the emergence, but it was related to the growth of the seedlings. Plants from higher altitude sites had a higher percentage and speed of emergence than those from lower elevation sites. No differentiation pattern was found in the growth in height and diameter of plants in relation to the altitude of the provenance site.

Index words: populations, variation pattern, seedling emergence, elevation.

2.1. Introducción

Pinus patula Schiede ex Schltdl. et Cham. es una conífera nativa de México, con amplia distribución en la Sierra Madre Oriental, y el rango altitudinal que ocupa va de los 1600 a los 3100 m (Perry, 1991; Nyoka, 2002). Dicha distribución, sugiere la posibilidad de que a través de procesos evolutivos se hayan conformado poblaciones en sintonía con el ambiente local y, por ende, haya diferenciación genética entre ellas (Rehfeldt, 1993).

La emergencia de las plántulas es crucial en la adaptación de la especie porque establece el contexto para el desarrollo posterior de la planta, además las condiciones ambientales que estimulan la emergencia, son aquellas que el nuevo individuo debe afrontar (Donahue, 2010). En parámetros germinativos, la variación dentro de la especie, generalmente se asocia con diferencias en las condiciones del sitio (Santelices *et al.*, 2017). En algunas especies el peso de la semilla influye en la emergencia (Calvo *et al.*, 2016), y determina en cierta medida, el crecimiento inicial (Xu *et al.*, 2016).

Para identificar patrones de variación se evalúan características adaptativas y se relacionan con características geográficas o climáticas del sitio de origen (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013; Martínez-Berdeja *et al.*, 2019). Uno de los factores geográficos con los que más se han relacionado los patrones de variación en las coníferas es la altitud (Sáenz-Romero, 2011). Para el manejo y conservación de los recursos genéticos se requiere conocer los patrones de variación genética intraespecífica (Furnier, 2004). Si existe un patrón de variación genética dentro del área de distribución natural de la especie se recomienda definir lineamientos para el movimiento de germoplasma, con la finalidad de que exista acoplamiento entre los genotipos y, por ende, las reforestaciones sean exitosas (Sáenz *et al.*, 2006).

En procedencias de *P. patula* del sur de Oaxaca se identificó que las poblaciones de altitud intermedia (2650) mostraron el mejor crecimiento en altura (Ruíz-Talonia *et al.*, 2014) en comparación con las poblaciones de los extremos altitudinales. Para las poblaciones de *P. patula* de la región centro de su distribución no se conocen los patrones de variación genética.

2.2. Objetivos

Objetivo general

Identificar la variación en características de semillas y crecimiento inicial en siete poblaciones de *P. patula* de diferente origen geográfico mediante la evaluación en ensayos de progenie, así como relacionar las características estudiadas con la altitud del lugar de origen de la población con la finalidad de identificar algún patrón de variación.

Objetivos específicos

- a) Determinar la variación en peso de semilla, emergencia y crecimiento inicial, en vivero, en siete poblaciones de *P. patula* del centro de su distribución natural.
- b) Relacionar el peso de la semilla con la emergencia y crecimiento inicial en vivero.
- c) Relacionar las características de las semillas y crecimiento inicial con la altitud de origen de las poblaciones.

2.3. Hipótesis

Las características de semillas y crecimiento se consideran características adaptativas. Tomando en cuenta, que tanto la emergencia como el crecimiento se presentan cuando las condiciones ambientales son idóneas, y que los sitios de donde proviene la semilla

presentan diferencias climáticas contrastantes (a los que las poblaciones están adaptadas); se deduce que existe variación genética (entre y dentro de las poblaciones) que es explicada en cierta medida por dichas diferencias ambientales del sitio de origen de la semilla.

2.4. Materiales y métodos

Recolección de semilla

La semilla se recolectó en siete poblaciones localizadas en la región centro de la distribución natural de la especie (Cuadro II-1). La recolecta se realizó en árboles dominantes, sanos, de fuste recto, con altura y diámetro superior al promedio del rodal. Se seleccionaron de cinco a ocho árboles en cada localidad, con un total de 49 individuos en las siete poblaciones. Los árboles estuvieron a distancias mayores de 100 m para evitar recolectar semilla de árboles emparentados. A través de escalado se obtuvieron conos maduros de polinización abierta de cada árbol en mayo y junio del 2018, los cuales se identificaron y transportaron al Laboratorio de Semillas y Germoplasma del Instituto de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, ubicado en Tulancingo, Hidalgo, lugar en donde se llevó a cabo el beneficio y almacenamiento de la semilla hasta su uso en el ensayo de emergencia.

En lo sucesivo, el término “procedencia” se utilizará para referirse a la localidad y “población” se refiere a la progenie que se derivó del conjunto de individuos que se incluyeron en cada muestra. El término “familia” se refiere al conjunto de individuos que se originaron de cada uno de los árboles seleccionados (es decir que tienen un progenitor común) en campo.

Cuadro II-1. Localidades y número de árboles de *Pinus patula* seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.

Localidad	Municipio	Entidad	Núm. Árboles	Altitud (msnm)	Temp. ^z (°C)	Ppt. ^y (mm)
Xonocuautila	Tlatlahuquitepec	Puebla	8	2579	12.5	613
Ojo de Agua	Huayacocotla	Veracruz	8	2532	15.2	848
Cumbre de Muridores	San Bartolo	Hidalgo	5	2361	15.3	830
Ejido Beristain	Beristain	Puebla	8	2342	13.7	832
La Cruz Verde	Metztlán	Hidalgo	5	2136	17.4	1105
El Reparo	Zacualtipán	Hidalgo	7	2068	15.8	1230
La Selva	Huayacocotla	Veracruz	8	1959	15.5	1186
Total			49			

^zTemp: temperatura promedio anual, ^yPpt: precipitación anual.

Con la ubicación geográfica (latitud, longitud y altitud) de cada población se obtuvieron las variables climáticas (temperatura y precipitación) contemporáneas con el modelo climático “thin plate splines” desarrollado para México (Crookston, 2010) que utiliza datos (del periodo 1961-1990) de 4000 estaciones meteorológicas de México, sur de Estados Unidos, Guatemala y Honduras. Este modelo se basa en la interpolación de superficies de datos usando el software ANUSPLINE (Hutchinson, 2004).

Siembra

La mezcla de sustratos para la siembra estuvo compuesta por 60 % aserrín, 15 % turba de musgo, 15 % tezontle y 10 % vermiculita, más 8 g L⁻¹ de fertilizante de liberación controlada de ocho meses (12-09-16) (Aguilera, 2016). Las semillas se sembraron en tubos rígidos de polietileno negro de 310 cm³ en diciembre de 2018, en condiciones de invernadero. La profundidad de siembra fue de aproximadamente 0.7 cm y se cubrió con vermiculita. En los días subsecuentes a la siembra se suministró riego ligero a diario y al iniciar la emergencia se regó cada tercer día.

Variables

Para determinar el peso de la semilla se pesaron en una balanza digital, ocho muestras de cien semillas por cada árbol seleccionado (Bonner, 1994) y se obtuvo un valor promedio por árbol. Se consideró plántula emergida cuando fueron visibles los cotiledones por encima de la superficie (Mukherjee *et al.*, 2004). El conteo de la emergencia se hizo cada tres días, comenzando en el día 30 (a partir de la siembra) que fue cuando iniciaron las primeras plántulas. El porcentaje de emergencia se definió como la proporción de semillas que emergió respecto al total que se sembró. La variable “tiempo medio de emergencia” (T₅₀) se definió como el día en que emergió el 50 % de la semilla que se sembró, por población, como una medida de la velocidad de emergencia.

A los dos, cuatro y seis meses de edad (a partir de la emergencia de la plántula), se midió la altura de la parte aérea y el diámetro en la base del tallo. La altura se midió en centímetros con una regla graduada y el diámetro en milímetros con un vernier digital Mitutoyo®.

Diseño experimental

El ensayo de emergencia se estableció en invernadero, con un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Después de emerger, las plántulas se llevaron a una casa sombra, manteniendo el mismo diseño de bloques completos al azar. Para medir altura y diámetro, se consideraron parcelas de 15 plantas por familia por bloque. El número de plantas que se midió por población varió de 225 a 360 dependiendo del número de familias que se incluyó en cada una de ellas (Cuadro II-1).

Análisis estadístico

Tanto para altura como para diámetro, se obtuvieron valores promedio por parcela previo al análisis de varianza. Para determinar las diferencias entre las procedencias se utilizó el ANOVA mediante el procedimiento GLM del programa estadístico SAS (SAS Institute, 2002) para cada variable evaluada. Se aplicó el modelo estadístico siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + P_j + E_{ij} \quad (1)$$

Donde: Y_{ij} es el valor de la característica de la j -ésima población en el i -ésimo bloque, μ es la media poblacional, B_i es el efecto del i -ésimo bloque, P_j es el efecto fijo de la j -ésima procedencia y E_{ij} es el error experimental. En variables que presentaron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey.

Para determinar la variación entre poblaciones se obtuvieron los componentes de varianza mediante el procedimiento VARCOMP con el método de máxima verosimilitud de SAS. La relación entre peso de semilla con emergencia y crecimiento inicial se evaluó con el coeficiente de correlación de Pearson. Para identificar el patrón altitudinal de

variación entre las características de emergencia, así como altura y diámetro con respecto a la altitud, se realizó un análisis de regresión lineal con el procedimiento REG de SAS (SAS Institute, 2002) de los valores medios de las poblaciones respecto a su altitud con el siguiente modelo:

$$Y_i = \beta_0 + B_1 X_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

Donde: Y_i es el valor medio de la i -ésima procedencia, β_0 es el intercepto, B_1 es el parámetro de regresión, X_i es la altitud de la i -ésima procedencia y ε_i es el error aleatorio. Para normalizar los datos de la variable porcentaje de emergencia se transformaron con la función arcoseno de la raíz divididos entre 100 porque no cumplía con el supuesto de normalidad.

2.5. Resultados y discusión

Peso de la semilla

Para el peso promedio de cien semillas hubo diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre las poblaciones (Figura 2-1). La media general entre las poblaciones para esta variable fue de 0.74 g. Los valores extremos obtenidos fueron de 0.61 a 0.88 g, para la población El Reparó y Ojo de Agua. La diferencia de 0.27 entre estos valores explica que las poblaciones con menor peso en cien semillas llegan a tener hasta 50, 298 más semillas en un kilogramo.

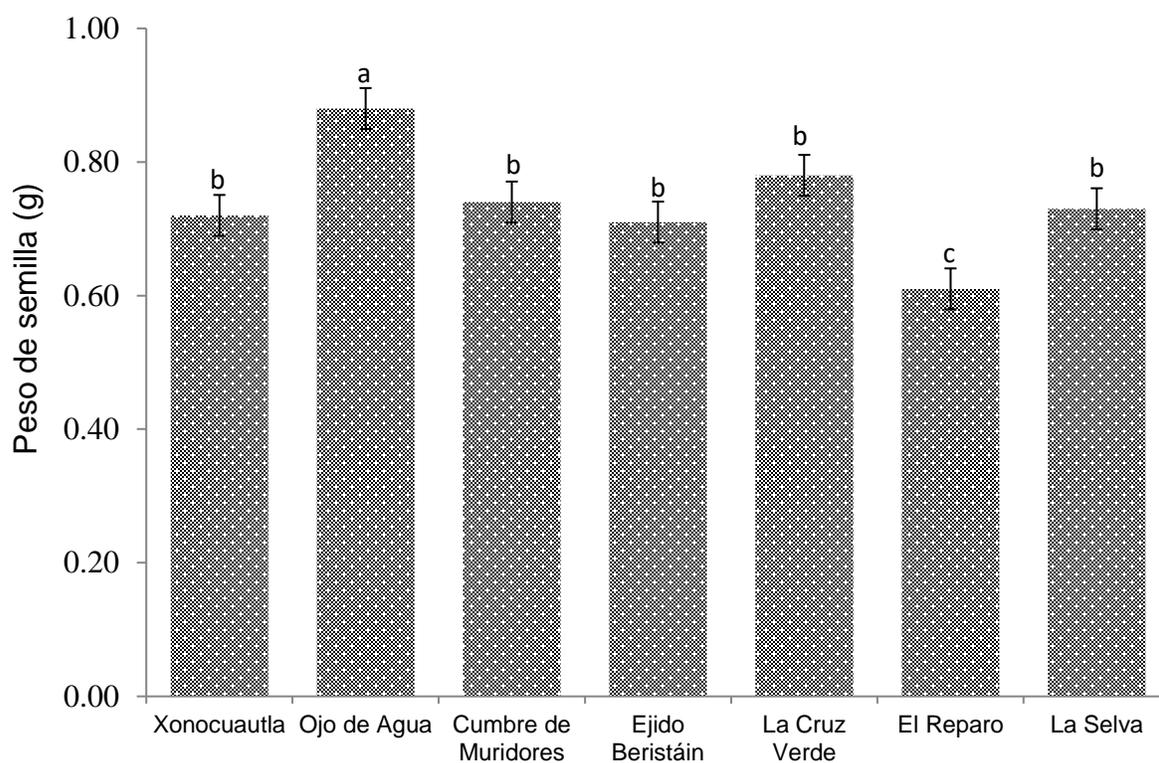


Figura 2-1. Peso promedio de cien semillas (g) ($\pm 1ES$) en siete poblaciones de *Pinus patula* de la zona centro de su distribución natural. Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas, Tukey ($p \leq 0.05$).

El peso de semilla es una característica variable a nivel de especie (tanto entre poblaciones como dentro de ellas); dicha variabilidad responde principalmente a factores genéticos y a la variabilidad ambiental (Castro, 1999; Méndez, 2017).

El rango de valores que se obtuvo corresponde con lo que se ha reportado para esta especie en otros trabajos, aunque en estos se reporta el peso individual de la semilla. Si en el presente trabajo se calcula el peso individual, a partir del peso de 100 semillas, este sería de 7.4 mg. Méndez (2017) obtuvo para árboles del ejido La Selva un peso promedio

individual de 7.6 mg; y para árboles de Villa Cuauhtémoc, Chignahuapan, Puebla de 8.6 mg.

Diferencias en emergencia

Las plántulas empezaron a emerger a los 30 días después de la siembra (Figura 2-2), a excepción de las semillas de La Cruz Verde, El Reparó y La Selva que iniciaron a los 33 días.

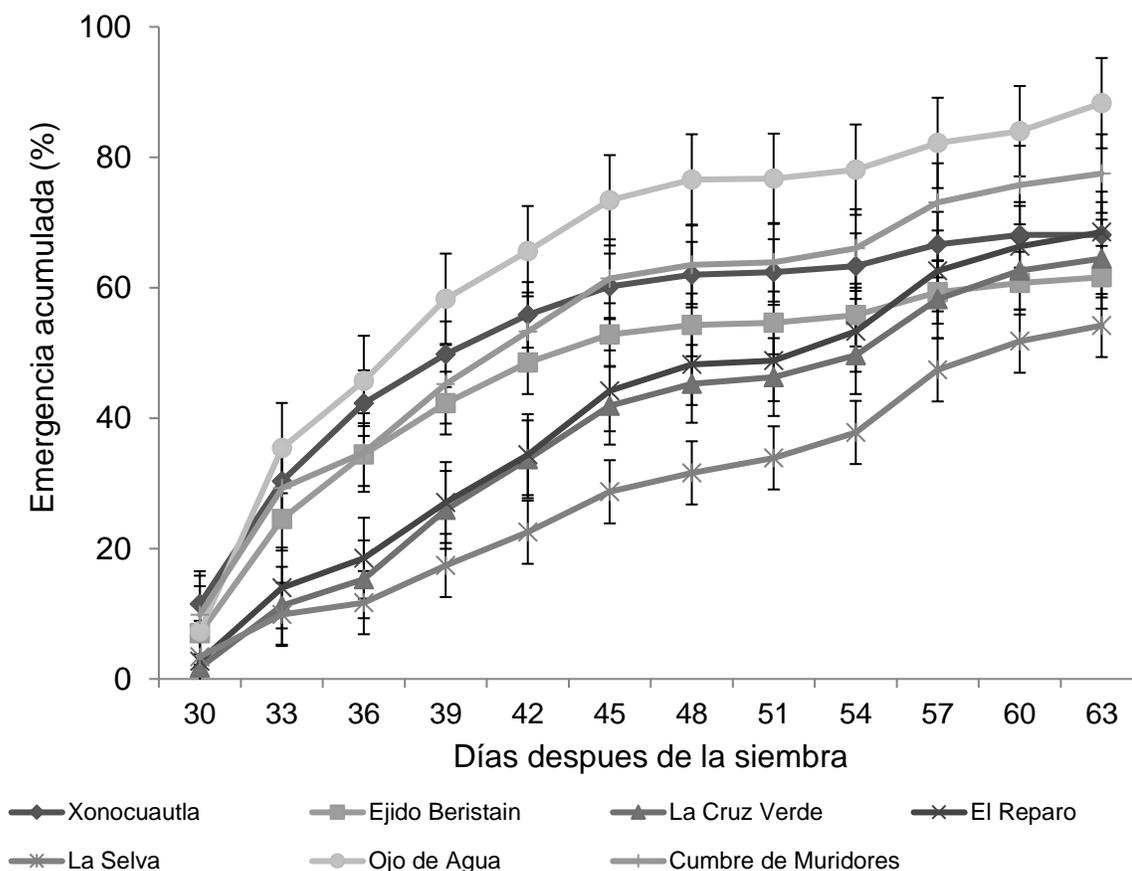


Figura 2-2. Curva de emergencia acumulada (%) ($\pm 1ES$) de semillas de siete poblaciones de *Pinus patula* de la zona centro de su distribución.

Las plantas de Xonocautla, Ojo de Agua, Cumbre de Muridores y Ejido Beristáin emergieron de manera más uniforme, ya que completaron, en promedio, 62 % de plantas emergidas a los 45 días (después de la siembra). Por el contrario, La Cruz Verde, El Reparo y La Selva alcanzaron 38.3 % de plantas emergidas en esta fecha. A partir del día 48, la curva para cada población comenzó a estabilizarse, a excepción de La Selva, que fue la población más tardía para emerger.

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre las poblaciones en las características de emergencia de las plántulas (Figura 2.3). Para otras especies como *Nothofagus glauca* (Phil.) (Santelices *et al.*, 2017) y *Pinus greggii* Engelm (Mendizabal-Hernández *et al.*, 2015) también se han reportado diferencias tanto en porcentaje como en velocidad de emergencia.

El porcentaje de emergencia fue alto en las poblaciones, a excepción de la Selva que presentó un valor intermedio (Figura 2-3). El promedio de plántulas emergidas fue 67.9 %. Las poblaciones de Ojo de Agua y Cumbre de Muridores presentaron 86.1 % de emergencia en promedio, en un estudio previo (Fuentes *et al.*, 2020). Si se consideran solo estas dos poblaciones en el presente estudio, el promedio sería similar (83.3 %).

En condiciones naturales del bosque, las plántulas emergen de la semilla en respuesta al aumento de la temperatura y humedad (Ramírez *et al.*, 2015) y el momento en que se presenta es crucial porque puede tener efectos en la supervivencia y crecimiento inicial de las plantas (Verdú y Traveset, 2005). El tiempo promedio para la emergencia del 50 % de las plantas fue de 39.3 días (Figura 2.3), con un rango de 35.5 (Xonocautla) hasta 45.3 días (La Selva). Valores altos indican que la semilla requirió de más días para

completar el 50 % de la emergencia del total de semillas sembradas, tal como se presentó en la semilla de La Selva, La Cruz Verde y El Reparó.

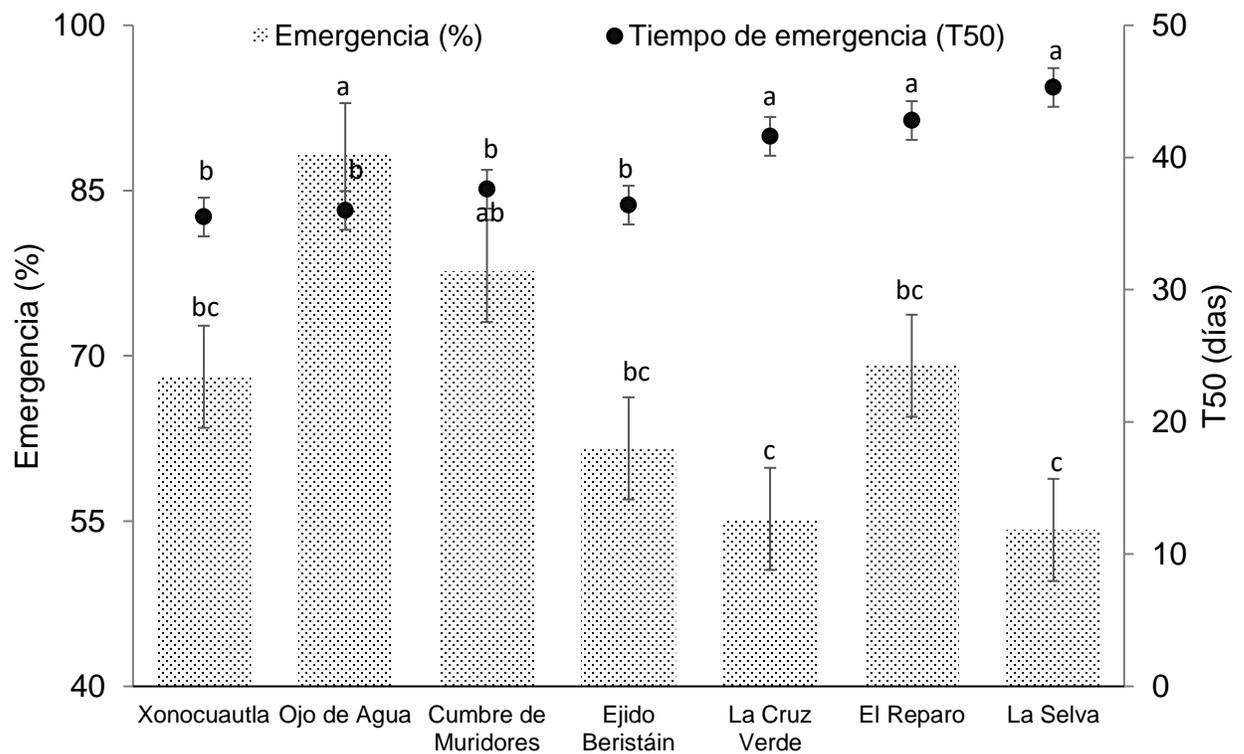


Figura 2-3. Porcentaje y tiempo de emergencia promedio (días) (± 1 ES) en poblaciones de *Pinus patula*. Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas. Tukey, ($p \leq 0.05$).

Diferencias en crecimiento

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre poblaciones en la variable altura a las diferentes edades en etapa de vivero (Cuadro II-2). Las plántulas de La Cruz Verde

mostraron valores sobresalientes en las tres mediciones, Ojo de Agua sobresalió a los 4 y 6 meses. Por el contrario, las plantas de Xonocuautila, El Reparó y La Selva presentaron menor desarrollo en altura.

Cuadro II-2. Valores medios de altura (cm) (\pm 1ES) en plantas de siete poblaciones de *Pinus patula* de la región centro de su distribución natural.

Población	Altura de las plantas (cm)		
	2 meses	4 meses	6 meses
Xonocuautila	4.5 \pm 0.04 c[¶]	10.0 \pm 0.08 bc	26.5 \pm 0.19 cd
Ojo de Agua	4.7 \pm 0.04 b	10.6 \pm 0.08 a	27.9 \pm 0.20 a
Cumbre de Muridores	4.8 \pm 0.06 b	10.2 \pm 0.10 bc	27.0 \pm 0.28 abc
Ejido Beristáin	4.8 \pm 0.04 b	10.2 \pm 0.08 bc	26.8 \pm 0.21 bcd
La Cruz Verde	5.2 \pm 0.06 a	10.3 \pm 0.09 ab	27.5 \pm 0.26 ab
El Reparó	4.7 \pm 0.05 bc	9.4 \pm 0.09 d	25.8 \pm 0.23 d
La Selva	4.6 \pm 0.04 bc	9.9 \pm 0.09 c	26.7 \pm 0.20 bcd

[¶]Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

La diferencia en altura entre los valores extremos fue disminuyendo con la edad. A los dos meses la diferencia fue de 13.4 %, a los cuatro meses de 11.3 % y a los seis de 7.5 %. Las semillas de Xonocuautila emergieron primero, sin embargo, en las tres fechas de medición presentaron menor crecimiento en altura. En contraste, las plantas de Cruz Verde ocuparon más tiempo para emerger, pero en las tres edades mostró el mejor desempeño en altura.

En cuanto al diámetro, a los dos meses de la emergencia, se identificó la mayor diferenciación entre las poblaciones (Cuadro II-3), relacionado quizás con las diferencias en la velocidad con la que emergieron. A los 4 meses, solo las plantas de La Cruz Verde

sobresalen del resto de las procedencias, pero esto cambia a los 6 meses, porque a esta edad las plantas de Ojo de Agua mostraron el mayor diámetro.

Cuadro II-3. Valores medios de diámetro (mm) (± 1 ES) en plantas de poblaciones de *Pinus patula* de la región centro de su distribución natural.

Población	Diámetro del tallo (mm)		
	2 meses	4 meses	6 meses
Xonocuautila	1.0 \pm 0.01 cd [†]	1.7 \pm 0.01 b	3.5 \pm 0.03 ab
Ojo de Agua	1.1 \pm 0.01 ab	1.8 \pm 0.02 b	3.6 \pm 0.03 a
Cumbre de Muridores	1.1 \pm 0.01 bc	1.8 \pm 0.03 b	3.5 \pm 0.05 ab
Ejido Beristáin	1.1 \pm 0.00 bc	1.8 \pm 0.01 b	3.5 \pm 0.03 ab
La Cruz Verde	1.1 \pm 0.01 a	1.9 \pm 0.02 a	3.5 \pm 0.04 ab
El Reparó	1.0 \pm 0.01 d	1.7 \pm 0.02 b	3.4 \pm 0.03 b
La Selva	1.1 \pm 0.01 c	1.8 \pm 0.02 b	3.6 \pm 0.02 a

[†] Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

En algunos casos, las plántulas que emergen con mayor velocidad toman ventaja en el crecimiento inicial para favorecer el establecimiento de las plantas que podría ser el caso de las plántulas de Ojo de Agua. En el caso de La Cruz Verde, aunque la emergencia tomo más días, las plantas fueron de igual tamaño que las plantas de Ojo de Agua, lo que puede reflejar mayor velocidad de crecimiento en altura.

Variación entre poblaciones

Las poblaciones se diferenciaron en mayor medida en características de las semillas (Cuadro II-4). En el caso de los parámetros de emergencia se atribuyó mayor variación entre las familias; para la altura y diámetro la mayor parte de la variación se atribuyó al error experimental.

Cuadro II-4. Componentes de la varianza para características de germinación, altura y diámetro de plántulas de *Pinus patula* de poblaciones del centro de su distribución natural.

Característica	Población (%)^z	Familias (%)	Error (%)
Peso semilla	14.1	77.8	8.1
Porcentaje de emergencia	28.7	51.2	20.1
Tiempo medio de emergencia (T ₅₀)	36.0	44.0	20.0
Altura 2 meses	2.9	36.8	60.3
Altura 4 meses	6.2	29.3	64.5
Altura 6 meses	3.0	43.3	53.7
Diámetro 2 meses	8.6	44.4	47.0
Diámetro 4 meses	5.8	11.8	82.4
Diámetro 6 meses	1.5	18.4	80.1

^zPorcentaje respecto al total de la varianza estimada.

De acuerdo al análisis de componentes de la varianza, el diámetro fue la característica menos variable entre las poblaciones. Los porcentajes de variación atribuidos entre las poblaciones en las características de las semillas indican diferencias genéticas entre ellas, en mayor medida en la energía germinativa. Tales diferencias, pueden estar

relacionadas con los diferentes ambientes en los que se desarrollan los árboles (Juárez-Agis *et al.*, 2006).

En características de crecimiento es común que la mayor variación se atribuya al error experimental (Capilla, 2018) tal y como sucedió en el presente trabajo. Generalmente la variación entre procedencias, en vivero, es menor del 15 % (Loya-Rebollar, 2012; Castellanos-Acuña, 2013).

Relación del peso de la semilla con la emergencia y crecimiento inicial

El peso de la semilla no se relacionó de manera significativa ($p \leq 0.05$) con las variables de emergencia (Cuadro II-5). Similar a lo que se presenta en *Juniperus procera* Endl. (Mamo *et al.*, 2006) y *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser (Santelices *et al.*, 2017), en donde el peso de la semilla no influye en las características germinativas. Sin embargo, el peso de la semilla se correlacionó de manera significativa ($p \leq 0.05$) y positiva con la altura y diámetro, es decir, la semilla más pesada originó plantas de mayor altura y mayor diámetro. *Pinus densata* Mast. presenta este mismo patrón (Xu *et al.*, 2014).

Cuadro II-5. Coeficiente de correlación de Pearson entre peso de semilla con características de emergencia, altura y diámetro.

Factor	E ^z	T ₅₀ ^y	A2 ^x	A4 ^w	A6 ^v	D2 ^u	D4 ^t	D6 ^s
PS ^r	0.42	-0.38	0.22	0.95*	0.96*	0.86*	0.56	0.81*

*significativo con $p < 0.05$. ^zE: porcentaje de emergencia, ^yT₅₀ tiempo medio de emergencia, ^xA2: altura a los dos meses, ^wA4 altura a los cuatro meses, ^vA6: altura a los seis meses, ^uD2: diámetro a los dos meses, ^tD4: diámetro a los cuatro meses, ^sD6: diámetro a los seis meses. ^rPS: peso promedio de 100 semillas.

Relación entre características de la semilla y crecimiento de las plántulas con la altitud de origen de la semilla

No se encontró relación significativa ($p \leq 0.05$) entre el peso de la semilla y la altitud. Sin embargo, las variables porcentaje y tiempo de emergencia se relacionaron de forma positiva y negativa, respectivamente. Es decir, la semilla proveniente de sitios de mayor altitud mostró mayor porcentaje de emergencia y lo hizo en menos tiempo, en comparación con la semilla de origen altitudinal menor (Figura 2-4). Por otro lado, la altura y diámetro no se correlacionaron de manera significativa con la altitud.

Se ha sugerido que la capacidad y velocidad de germinación es mayor en semilla que proviene de ambientes limitativos, ya que podría favorecer el establecimiento de plántulas en sitios que presentan la estación de crecimiento más corta (Juárez-Agis *et al.*, 2006). Xocuautila, Ojo de Agua, Cumbre de Muridores y Ejido Beristáin se considerarían sitios con ambientes restrictivos ya que presentan menor precipitación y temperatura promedio anual si se comparan con La Cruz Verde, El Reparó y La Selva (Cuadro II-1). En este caso las temperaturas más bajas están relacionadas con la altitud a la que se encuentran dichas poblaciones, lo que explicaría la correlación que se encontró entre los parámetros de emergencia con la altitud.

En *Betula papyrifera* Marsh. (Benowicz, 2001) y *Pinus chiapensis* (Martínez) Andresen (Capilla, 2018) se encontró un patrón similar con características de germinación, en el que la semilla de origen altitudinal mayor tiene más capacidad y velocidad germinativa. En otras coníferas como *A. religiosa* (Ortiz-Bibian, 2019) y *P. pseudostrobus* (López-Toledo *et al.*, 2017) la altitud de origen de las poblaciones se relacionó con las

características de germinación, con un patrón diferente, en el que las poblaciones de altitud intermedia mostraron mayor capacidad y velocidad de germinación.

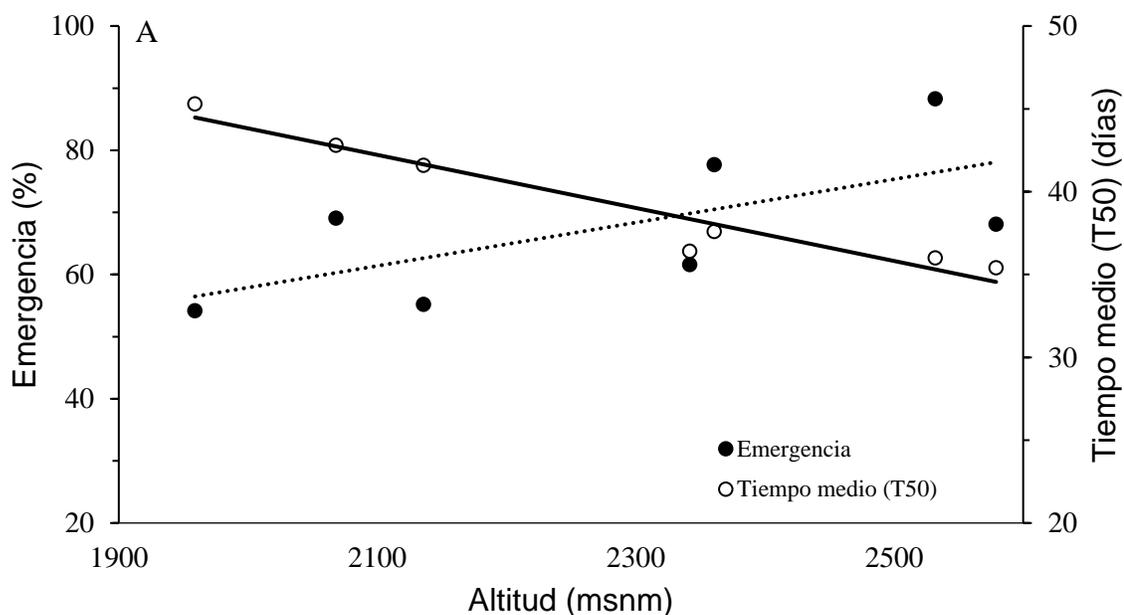


Figura 2-4. Relación del porcentaje y tiempo medio de emergencia (días) con la altitud de origen de siete poblaciones de *Pinus patula* de la zona centro de su distribución.

2.6. Conclusiones

El peso y emergencia de las semillas, así como la altura y diámetro de plántulas difiere entre las poblaciones de *P. patula* estudiadas, donde las semillas de sitios de menor altitud retrasaron su emergencia en relación a aquellas de mayor altitud. Además, las semillas de mayor peso generaron plantas más grandes. Estos resultados son útiles para planear la producción de planta en vivero y para ser considerados al establecer lineamientos para el movimiento de semilla o plántulas fuera de su sitio de origen.

2.7. Recomendaciones

Se sugiere hacer evaluaciones posteriores en campo en las procedencias de este trabajo, ya que el patrón de diferenciación podría ser más evidente a mayor edad.

2.8. Literatura citada

- Benowicz A, R. Guy, M. R. Carlson, Y. A. El-Kassaby (2001) Genetic variation among paper birch (*Betula papyrifera* Marsh.) populations in germination, frost hardiness, gas exchange and growth. *Silvae Genetica* 50: 7-13.
- Bonner T., J. Vozzo, W. Elam and S. Land (1994) Tree Seed Technology Training Course. Instructor's Manual. USDA, Forest Service. General Technical Report SO-106. New Orleans, Louisiana. 160 p.
- Calvo L., V. Hernández, L. Valbuena y A. Taboada (2016) Provenance and seed mass determine seed tolerance to high temperatures associated to forest fires in *Pinus pinaster*. *Annals of Forest Science* 73:381–391, <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0527-0>
- Capilla E. D. (2018) Variación en indicadores reproductivos, germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Pinus chiapensis*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Campus Montecillos. Montecillos, Texcoco, Méx. 74 p.
- Castellanos-Acuña D., C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, N. 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. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 3:399-411, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.02.007>
- Clair S. B. and R. Jhonson (2004) Structure of Genetic Variation and Implications for the Management of Seed and Planting Stock. In Riley L. E., K. R. Dumroese, T. D. Landis. Coords. National proceedings: Forest and Conservation Nursery

Associations 2003. Fort Collins, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 33 p.

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2019) El sector forestal mexicano en cifras. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/el-sector-forestal-mexicano-en-cifras-2019> (mayo 2020).

Crookston N. L. (2010) Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate/> (Consultado: Marzo 2021).

Donohue K., R. Rubio de Casas, L. Burghardt, K. Kovach and Ch. Willis (2010) Germination, postgermination, adaptation and species ecological ranges. *Annual review of ecology, evolution and systematics* 41:293-319, <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144715>

FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (1991) Guía para la manipulación de semillas forestales. Centro de Semillas Forestales de DANIDA. Roma, Italia. <http://www.fao.org/3/ad232s/ad232s00.htm> (marzo, 2020).

Fuentes-Amaro S. L., R. Rodríguez-Laguna, R. Razo-Zarate, J. Meza-Rangel y G. A. López-Zepeda (2020) Energía germinativa en árboles selectos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 7: 68-78.

Furnier G. R. (2004) Métodos para medir variación genética en las plantas. In: Manejo de Recursos Genéticos Forestales. 2a edición. J. J. Vargas H., B. Bermejo V. y F. T.

- Ledig (eds.). Colegio de Postgraduados, Comisión Nacional Forestal. Montecillo, Edo. de México y Zapopan, Jalisco, México. pp: 20-30.
- Guo C., Y. Shen and F. Shi (2020) Effect of temperature, light, and storage time on the seed germination of *Pinus bungeana* Zucc. ex Endl.: the role of seed-covering layers and abscisic acid changes. *Forests* 11: 300, <https://doi.org/10.3390/f11030300>
- Hutchinson, M. F. 2004. ANUSPLIN version 4.3 user guide. Centre for resource and environmental studies, The Australian National University, Canberra. 54 p.
- Juárez-Agis A., J. López-Uptón, J. Vargas-Hernández y C. Sáenz-Romero (2006) Variación geográfica en la germinación y crecimiento inicial de plántulas de *Pseudotsuga menziesii* de México. *Agrociencia* 40: 783-792.
- López-Toledo L., M. Heredia-Hernández, D. Castellanos-Acuña, A. Blanco-García and C. Sáenz-Romero (2017) Reproductive investment of *Pinus pseudostrobus* along an altitudinal gradient in Western Mexico: implications of climate change. *New Forests* 48:867- 881, <https://doi.org/10.1007/s11056-017-9602-8>
- Loya-Rebollar E., C. Sáenz-Romero, R. A. Lindig-Cisneros, P. Lobit, J. A. Villas-Moreno y N. M. Sánchez-Vargas (2013) Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica*, 62: 86-95.
- Magnussen S. and C. W. Yeatman (1990) Predictions of genetic gain from various selection methods in open pollinated *Pinus banksiana* progeny trials. *Silvae Genetica* 39: 140-153.

- Mamo N., M. Mihretu, M. Fekadu, M. Tigabu and D. Teketay (2006) Variation in seed and germination characteristics among *Juniperus procera* populations in Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 225: 320-327, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.026>
- Martínez-Berdeja A., J. A. Hamilton, A. Bontempsa, J. Schmitta, and J. W. Wright (2019) Evidence for population differentiation among Jeffrey and Ponderosa pines in survival, growth and phenology. *Forest Ecology and Management* 434: 40-48, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.009>
- Méndez N. M. (2017) Diversidad genética y sistema de cruzamiento en poblaciones de *Pinus patula*. Tesis Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Texcoco, Méx. 87 p.
- Mukherjee R., C. Thapliyal and S. S. Phartyal (2004) Seed source variation in cone, seed and seedling characteristic across the natural distribution of himalayan low level pine *Pinus roxburghii* Sarg. *Silvae genetic* 53: 116-123, <https://doi.org/10.1515/sg-2004-0021>
- Nyoka B. I. (2002) *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. In: CAB International (comp). Pines of Silvicultural Importance. London, UK. CABI Publising. p. 303-316.
- Ortiz-Bibian M. A., D. Castellanos-Acuña, M. Gómez-Romero, R. Linding-Cisneros y M. A. Silva-Farías (2019) Variación entre poblaciones de *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham a lo largo de un gradiente altitudinal. I. Capacidad germinativa de la semilla.

Revista Fitotecnia Mexicana 42: 301-308, <https://doi.org/10.35196/rfm.2019.3.301-308>

Perry J. P. (1991) *The pines of México and Central America*. Timber Press, Inc. Portland, Oregon. USA. 231 p.

Rehfeldt G. E. (1993) Genetic variation in the ponderosa of the Southwest. *American Journal of Botany* 80: 330-343.

Romero-Arenas O., A. T. Rivera, J. López-Olguín, O. E. Villarreal, M. L. Huerta, y C. L. Parraguirre (2013) Germinación de semillas de *Pinus patula* en residuos de nuez (*Juglans regia* L.) en vivero. *Revista Ibeoramericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*. <https://www.ciba.org.mx/index.php/CIBA/article/view/21> (abril, 2020)

Ruíz-Talonia F. L., N. M. Sánchez-Vargas, J. S. Bayuelo-Jiménez, S. I. Lara-Cabrera and C. Sáenz-Romero (2014) Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula* provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change. *Silvae Genetica* 63: 139-149, <https://doi.org/10.1515/sg-2014-0019>

Sáenz-Romero C. (2011) Guía para mover altitudinalmente semillas y plantas de *Pinus oocarpa*, *P. devoniana* (= *P. michoacana*), *P. pseudostrobus*, *P. patula* y *P. hartwegii* para restauración ecológica, conservación, plantaciones comerciales y adaptación al cambio climático. Versión 4.0., Grupo de Trabajo sobre Recursos Genéticos, Comisión Forestal de América del Norte.

https://www.fs.fed.us/global/nafc/genetics/2009/SaenzRomero_2011_GuiaAltitudinal_v04.pdf. (marzo, 2020).

Sáenz-Romero C., L. Ruiz-Talonia, J. Beaulieu, N. Sánchez-Vargas, G. Rehfeldt (2011) Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34:19-25.

Sáenz-Romero C., R. Guzmán-Reyna, G. E. Rehfeldt (2006) Altitudinal genetic variation among *Pinus oocarpa* populations in Michoacán, México; implications for seed zoning, conservation of forest genetic resources, tree breeding and global warming. *Forest Ecology and Management* 229:340-350.

Santelices M. R., S. M. Espinoza, D. Magni, A. A. Cabrera, C. S. Donoso and K. Peña-Rojas (2017) Variability in seed germination and seedling growth at the intra- and interprovenance levels of *Nothofagus glauca* (*Lophozonia glauca*), an endemic species of Central Chile. *New Zealand Journal of Forestry Science* 47: 1-10, <https://doi.org/10.1186/s40490-017-0091-5>

SAS Institute (2002) SAS®/STAT 9.0. SAS Institute. Cary, North Carolina. USA.

Weber J. C. and F. C. Sorensen (1992) Geographic variation in speed of seed germination in central Oregon ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Dougl.ex Laws). United States Department of Agriculture, Forest Service. https://www.researchgate.net/publication/241946123_Geographic_variation_in_speed_of_seed_germination_in_central_Oron_ponderosa_pine_pinus_ponderosa%27_dougl_ex_laws_Forest_Service_research_paper (Abril 2020).

White T. L., W. T. Adams and B. D. Neale (2007) *Forest Genetics*. CAB Int., Oxford. 682 p.

Xu Y., N. Cai, B. He, R. Zhang, W. Zhaos, J. Mao, A. Duan, Y. Li and K. Woeste (2014) Germination and early seedling growth of *Pinus densata* Mast. provenances. *Journal Forest Research* 27: 283-294, <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0186-x>

Capítulo III.

Variación en el crecimiento de árboles de *Pinus patula* de diferentes procedencias establecidas en campo

Resumen

Con la finalidad de aumentar la productividad forestal se inició un programa de mejora genética de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham., especie de amplio uso e importancia en la región centro de México. El manejo de los recursos genéticos requiere conocer los patrones de variación intraespecífica. De tal manera, el objetivo fue evaluar la variación en la supervivencia, altura y diámetro de ocho poblaciones de *P. patula* en dos sitios de plantación, así como relacionar dichas variables con las características climáticas (temperatura y precipitación) del sitio de origen de la progenie para identificar algún patrón de variación. Los ensayos se establecieron en dos sitios, con diseño de bloques completos al azar, uno en Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo. (1993 msnm) y otro en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. (2312 msnm). Se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre sitios de plantación en todas las variables. Las poblaciones mostraron mayor altura y diámetro en Tlatoxca. Se identificaron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre poblaciones en las características de crecimiento dentro de cada sitio de plantación. El porcentaje de variación genética entre poblaciones vario de 0 a 3 %, con los mayores valores en Ojo de Agua. En Tlatoxca, las plantas que proceden de sitios con mayor temperatura y humedad mostraron mayor crecimiento en altura en comparación con las plantas que provienen de sitios más fríos y secos. En Ojo de Agua no se encontró relación entre la altura y diámetro con las variables climáticas del sitio de origen.

Palabras clave: *Pinus patula*, recursos genéticos, patrón de variación, población.

Abstract

In order to increase forest productivity, a genetic improvement program was started for *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham., a species of wide use and importance in the central region of Mexico. The management of genetic resources requires knowing the patterns of intraspecific variation. In this way, the objective was to evaluate the variation in the survival and initial growth of eight populations of *P. patula* in two plantation sites, as well as to relate the growth of the plants with the climatic characteristics (temperature and precipitation) of site of origin to identify some pattern of variation. The trials were established in two sites, with a randomized complete block design, one in Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo. (1993 masl) and other in Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. (2312 masl). Significant differences ($p < 0.05$) were found between plantation sites in all variables. The populations showed greater growth in Tlatoxca. Significant differences ($p < 0.05$) were identified between populations in growth characteristics within each plantation site. The percentage of genetic variation between populations ranged from 0 to 3%, with the highest values in Ojo de Agua. In Tlatoxca, the plants that come from sites with higher temperature and humidity showed greater growth in height compared to the plants that come from colder and drier sites. In Ojo de Agua no relationship was found between height and diameter with climatic variables of origin site.

Keywords: *Pinus patula*, genetic resources, variation pattern, population.

3.1. Introducción

Pinus patula es de rápido crecimiento, su madera es de calidad, y es de gran importancia económica con potencial para el establecimiento de plantaciones (Nyoka, 2002; Flores y Moctezuma-López, 2021). Se distribuye principalmente sobre la Sierra Madre Oriental (Perry, 1991) de los 1600 a 3100 msnm, de modo que las poblaciones enfrentan diferentes ambientes, y que, a través de procesos evolutivos se hayan generado poblaciones en sintonía genética con el ambiente local (Rehfeldt, 1993; Butnor *et al.*, 2019).

La distribución de cada especie está determinada en buena medida por la precipitación y temperatura (Vitasse *et al.*, 2009). Las poblaciones de climas fríos generalmente muestran menor crecimiento comparadas con las poblaciones de ambientes cálidos, ya que se asume que existe compensación entre adaptación al estrés y crecimiento (White *et al.*, 2007; Ruiz-Talonia *et al.*, 2014).

Para *P. patula* se han identificado algunos patrones de variación. En poblaciones de Hidalgo, Puebla y Veracruz, las semillas de sitios de mayor altitud emergen con mayor rapidez en comparación con semillas provenientes de localidades de menor altitud (Fuentes *et al.*, 2021). En procedencias de *P. patula*, de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tlaxcala y Querétaro, las plantas (2.5 años) de origen altitudinal mayor presentan menor crecimiento en altura en comparación con las plantas de sitios de menor elevación (Salazar *et al.*, 1999).

Sin embargo, los patrones no siempre son consistentes entre regiones o entre características (Clair y Jhonson, 2004). En Ixtlán, Oaxaca, el crecimiento en altura de *P.*

patula, presenta una relación cuadrática con la altitud (plantas de 36 meses de edad) (Ruiz-Talonia *et al.*, 2014), en donde las procedencias de altitud intermedia muestran el mejor desempeño.

El conocimiento acerca de la adaptación de las poblaciones de una especie a diferentes ambientes es útil para poder establecer medidas que incrementen la productividad de las plantaciones, al mejorar el acoplamiento entre las condiciones ecológicas del sitio de plantación y las características genéticas de las plántulas (Rehfeldt, *et al.*, 2014). Si no existe diferenciación entre poblaciones a lo largo de gradientes climáticos el movimiento de semillas y plántulas se simplifica, ya que podrían moverse libremente dentro del rango de distribución de la especie (Castellanos-Acuña *et al.*, 2013).

3.2. Objetivo

Evaluar la variación en la supervivencia, altura y diámetro en plantas de ocho poblaciones de *P. patula* en dos sitios de plantación, así como relacionar estas variables con las características climáticas (temperatura y precipitación) del sitio de origen de la progenie para identificar algún patrón de variación.

3.3. Hipótesis

Dado que *P. patula* se distribuye en un amplio rango de condiciones ambientales, se deduce que las poblaciones enfrentan diferentes presiones de selección y a través de procesos evolutivos se han diferenciado para poder adaptarse a las condiciones del sitio donde crecen, por lo tanto, se espera que existan diferencias entre las poblaciones en características adaptativas como supervivencia y crecimiento, y que las plantas de

poblaciones de sitios fríos crezcan en menor medida que las plantas de poblaciones de sitios más cálidos.

3.4. Metodología

Colecta y siembra de semilla

Se obtuvo semilla de polinización libre de 64 árboles distribuidos en Hidalgo, Puebla y Veracruz en 2018 (Cuadro III-1). Sin embargo, en este apartado se analizan 52 familias agrupadas en ocho poblaciones. La colecta se realizó en árboles sanos, de fuste recto, de altura y diámetro sobresaliente, a por lo menos 100 m de distancia entre ellos. La siembra se realizó en diciembre de 2018. En lo sucesivo, el término “procedencia” se utilizará para referirse a la localidad de origen y “población” se refiere a la progenie derivada del conjunto de individuos de cada procedencia.

En septiembre de 2019 se estableció el ensayo con plantas de 9 meses de edad en el rancho Tlatoxca ubicado en Zacualtipán, Hidalgo. El segundo ensayo se estableció en Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz en octubre del mismo año. En ambos sitios se utilizó un diseño de bloques completamente al azar y parcelas de un solo árbol por familia. En Tlatoxca se establecieron 20 bloques y en Ojo de Agua 21, por lo que el número de plantas fue de 1280 y 1344 respectivamente. El método de plantación utilizado fue cepa común en marco real, la distancia entre individuos fue de 3x3 m; además, se plantó una hilera de árboles de *P. patula* como franja de protección en el perímetro de cada ensayo.

El Rancho Tlatoxca se ubica a 1993 m de altitud, con clima templado-húmedo con abundante lluvia en verano (1500 mm), temperatura promedio entre 16 y 20 °C, el tipo de suelo es regosol. El sitio de Ojo de Agua se encuentra a 2310 m de elevación, presenta

clima templado húmedo con abundante lluvia en verano (950 mm), temperatura promedio entre 12 y 18 °C y suelo tipo luvisol (INEGI, 2019).

Cuadro III-1. Localidades y número de árboles de *Pinus patula* seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.

Localidad	Municipio	Entidad	Núm. Árboles	Altitud (msnm)	Temp. ^z (°C)	Ppt. ^y (mm)
Xonocuatla	Tlatlahuquitepec	Puebla	8	2579	12.5	613
Ojo de Agua	Huayacocotla	Veracruz	8	2532	15.2	848
Cumbre de Muridores	San Bartolo	Hidalgo	5	2361	15.0	830
Ejido Beristáin	Beristain	Puebla	8	2342	13.7	832
Tierra Blanca	Metztitlán	Hidalgo	3	2157	16.0	1100
La Cruz Verde	Metztitlán	Hidalgo	5	2136	17.4	1105
El Reparó	Zacualtipán	Hidalgo	7	2068	15.8	1230
La Selva	Huayacocotla	Veracruz	8	1959	15.5	1186
Total			52			

^zTemp: temperatura promedio anual, ^yPpt: precipitación anual.

Variables evaluadas

Al realizar la plantación en campo (septiembre y octubre 2019), se midió altura y diámetro de cada una de las plantas, la cual se utilizó como covariable. El 20 de junio y

18 de diciembre de 2020 cuando las plantas tenían 9 y 15 meses de plantadas, se evaluó la supervivencia, altura y diámetro. En Tlatoxca se consideraron solo 12 bloques en la toma de datos. La supervivencia fue evaluada con “1” para planta viva y “0” para planta muerta. La altura se midió con una regla graduada en centímetros, desde la base del tallo hasta el ápice terminal. El diámetro se midió a 2 cm de la base del tallo, con un vernier digital marca Mitutoyo® en milímetros.

Análisis de datos

Para altura y diámetro se realizó análisis de varianza en conjunto para los dos sitios y para cada sitio en particular con el procedimiento GLM de SAS utilizando la medición inicial como covariable, con el modelo siguiente:

$$Y_{ijk} = \text{inicial} + \mu + S_i + B_j(S_i) + P_k + S_i * P_k + F_l(P_k) + E_{ijkl}$$

En donde: inicial: es la altura o diámetro inicial, μ es la media general de la población, S_i es el i-ésimo sitio, $B_j(S_i)$ es el j-ésimo bloque anidado en el i-ésimo sitio, P_k es la k-ésima procedencia, $S_i * P_k$ es la interacción entre la procedencia y el sitio de plantación, $F_l(P_k)$ es la l-ésima familia anidada en poblaciones, y E_{ijkl} es el error experimental. Para el análisis por sitio se utilizó el mismo modelo, eliminando el efecto sitio y sus interacciones.

Para el análisis de la supervivencia, los datos se obtuvieron en porcentaje por población y se transformaron con la función arcoseno previo al análisis estadístico para que cumplieran con el supuesto de normalidad. Se realizó prueba de Tukey en las variables que mostraron diferencias estadísticas en las mediciones de junio y diciembre.

Se utilizó análisis de regresión con la opción PROCREG de SAS (SAS, 2002) para relacionar la altura y diámetro (medidos a los 15 meses) con la temperatura y precipitación de cada procedencia aplicando el siguiente modelo:

$$Y_i = \beta_0 + B_1 X_i + \varepsilon_i$$

Donde: Y_i es el valor medio de la i -ésima población, β_0 es el intercepto, B_1 es el parámetro de regresión, X_i es la altitud de la i -ésima procedencia y ε_i es el error aleatorio.

3.5. Resultados y discusión

Variación entre sitios

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre sitios en altura y diámetro en las dos edades (Cuadro III-2). Las plantas fueron más altas y de mayor diámetro en Tlatoxca (sitio de menor altitud) en las dos edades, lo que era esperado porque este sitio es más cálido y húmedo. En Tlatoxca las plantas fueron, en promedio, 1.5 % y 6.9 % más altas que en Ojo de Agua, en junio (9 meses de plantados) y diciembre (15 meses de plantados), respectivamente. Del mismo modo, el diámetro fue 20.9 % y 14 % mayor en Tlatoxca en ambas fechas.

En otras coníferas como *Pseudotsuga menziesii* var. *menziesii* (Mirb.) Franco, se identificó el mismo patrón, en donde el mayor crecimiento se presenta en los sitios de menor elevación (Ye y Jayawickrama, 2014). Se asume que las plantas reducen su crecimiento potencial al plantarse en sitios de mayor elevación (Li *et al.*, 2003), lo que se

ha reportado para otras especies forestales (Martínez-Berdeja *et al.*, 2019) y para *P. patula* en poblaciones de Oaxaca, México (Ruiz *et al.*, 2014).

Para la supervivencia se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre sitios en la medición de diciembre (Cuadro III-2). En los dos sitios la supervivencia fue cercana al 100 % en las dos mediciones. Lo anterior, se puede atribuir al hecho de que en ambos sitios se llevaron a cabo actividades culturales de deshierbes y habilitación de cajetes para captar agua de lluvia.

Cuadro III-2. Valor medio (\pm 1ES) de las variables de crecimiento y supervivencia de plantas de 8 poblaciones de *Pinus patula* de la región centro de su distribución en dos sitios de plantación.

	Ojo de Agua	Tlatoxca
9 meses de plantación (junio)		
Altura (cm)	53.4 \pm 0.27 b [¶]	54.2 \pm 0.39 a
Diámetro (mm)	8.1 \pm 0.04 b	9.8 \pm 0.07 a
Supervivencia (%)	99.9 \pm 0.18 a	99.4 \pm 0.81 a
15 meses de plantación (diciembre)		
Altura (cm)	79.5 \pm 0.44 b	85.0 \pm 0.80 a
Diámetro (mm)	17.2 \pm 0.08 b	19.6 \pm 0.19 a
Supervivencia (%)	99.9 \pm 0.00 a	99.2 \pm 0.01 b

[¶]Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

Variación entre poblaciones dentro de cada sitio

En Tlatoxca se encontró variación significativa ($p \leq 0.05$) entre las poblaciones en las dos fechas de medición (a excepción del diámetro en diciembre) (Cuadro III-3). En otras especies también se ha reportado diferenciación entre procedencias de diferente origen geográfico, lo cual indica que las poblaciones enfrentan diferentes presiones de selección (Vitasse *et al.*, 2009; Dixit y Kolb, 2020).

Cuadro III-3. Valor medio ($\pm 1ES$) de altura (cm) y diámetro (mm) de plantas de 8 poblaciones de *Pinus patula* en Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo.

Población	9 meses de plantados		15 meses de plantados	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
	(cm)	(mm)	(cm)	(mm)
Xonocuautila	52.2 \pm 0.85 b [¶]	10.0 \pm 0.15 a	78.9 \pm 1.8 b	20.2 \pm 0.10 a
Ojo de Agua	54.3 \pm 0.81 ab	9.8 \pm 0.14 a	87.5 \pm 2.1 ab	19.4 \pm 0.09 a
Cumbre de Muridores	52.3 \pm 1.17 ab	9.5 \pm 0.20 a	83.3 \pm 2.7 ab	18.9 \pm 0.12 a
Ejido Beristáin	55.3 \pm 1.09 ab	10.0 \pm 0.20 a	85.3 \pm 2.1 ab	19.8 \pm 0.10 a
Tierra Blanca	50.3 \pm 1.41 b	8.8 \pm 0.28 b	88.7 \pm 2.1 a	20.2 \pm 0.73 a
La Cruz Verde	56.3 \pm 1.60 a	9.9 \pm 0.31 a	84.4 \pm 3.3 ab	18.2 \pm 0.14 a
El Reparó	55.4 \pm 1.06 ab	9.9 \pm 0.19 a	86.5 \pm 2.4 ab	18.0 \pm 0.11 a
La Selva	53.7 \pm 0.99 ab	9.6 \pm 0.15 a	85.6 \pm 1.9 ab	17.8 \pm 0.09 a

[¶]Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

En este sitio, la diferencia en altura entre los valores extremos fue de 12.4 y 10.0 %, que corresponde a las poblaciones de Tierra Blanca y La Cruz Verde en junio (9 meses de plantados), y Xonocuatla y Tierra Blanca en diciembre (15 meses de plantados). El diámetro de Xonocuatla, Ojo de Agua y La Cruz Verde fue 6.4 % superior al de La Selva en junio. En diciembre las plantas de Xonocuatla presentaron el diámetro más sobresaliente, que fue 6.8 % superior al de Cumbre.

En Ojo de Agua también se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre poblaciones (a excepción de la altura en diciembre) (Cuadro III-4). La diferencia entre la población de menor y mayor crecimiento en altura fue de 5.5 % en las dos mediciones, que en junio correspondió a las poblaciones de Xonocuatla y La Cruz Verde; y en diciembre fueron Cumbre de Muridores y Tierra Blanca.

Xonocuatla mostró el diámetro más sobresaliente en junio, el cual fue 7.8 % superior al de la Selva que mostró el menor valor. Para diciembre, las plantas de La Selva también mostraron el menor desempeño en diámetro con diferencia de 6.4 % con las plantas de Ojo de Agua que fueron las más sobresalientes (Cuadro III-4).

El mayor crecimiento en Tlatoxca es resultado de las mejores condiciones para el crecimiento (temperatura y precipitación) lo que lleva a que las plantas puedan expresar en mayor medida su potencial (Ruíz-Talonia *et al.*, 2014). La plasticidad fenotípica de *P. patula* le permite adecuar su crecimiento de acuerdo al sitio donde se establece (Martínez-Berdeja *et al.*, 2019).

Cuadro III-4. Valor medio (\pm 1ES) de altura (cm) y diámetro (mm) de plantas de 8 poblaciones de *Pinus patula* en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

Población	9 meses de plantación		15 meses de plantación	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
	(cm)	(mm)	(cm)	(mm)
Xonocuautila	52.1 \pm 0.68 b [¶]	8.2 \pm 0.10 a	78.8 \pm 1.15 a	17.7 \pm 0.23 a
Ojo de Agua	54.0 \pm 0.62 ab	8.3 \pm 0.09 a	80.8 \pm 1.12 a	17.4 \pm 0.21 ab
Cumbre de Muridores	54.1 \pm 0.79 ab	8.0 \pm 0.12 ab	78.2 \pm 1.22 a	16.7 \pm 0.23 b
Ejido Beristáin	52.9 \pm 0.72 b	8.0 \pm 0.10 ab	79.2 \pm 1.19 a	17.4 \pm 0.22 ab
Tierra Blanca	54.3 \pm 1.08 ab	8.0 \pm 0.18 ab	82.5 \pm 1.69 a	17.7 \pm 0.31 a
La Cruz Verde	55.4 \pm 0.82 a	8.2 \pm 0.14 a	79.6 \pm 1.37 a	17.5 \pm 0.28 ab
El Reparó	52.8 \pm 0.74 b	8.0 \pm 0.11 ab	79.5 \pm 1.44 a	16.5 \pm 0.23 b
La Selva	53.6 \pm 0.64 ab	7.8 \pm 0.09 b	78.5 \pm 1.07 a	16.4 \pm 0.20 b

[¶] Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

En cuanto a la supervivencia no se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre las poblaciones en las dos mediciones en los dos sitios (Cuadro III-5). En Tlatoxca la supervivencia fue ligeramente menor en las dos fechas de evaluación. Las poblaciones mostraron valores alrededor del 100 % de supervivencia, lo que puede ser resultado del mantenimiento que se le ha dado a la plantación como deshierbe, cajeteo y riego de auxilio.

Cuadro III-5. Supervivencia promedio (%) de plantas de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de plantación

Población	9 meses de plantación		15 meses de plantación	
	(%)		(%)	
	<u>Ojo de Agua</u>	<u>Tlatoxca</u>	<u>Ojo de Agua</u>	<u>Tlatoxca</u>
Xonocuautila	100.0 ± 0.00 a [¶]	99.2 ± 0.22 a	99.9 ± 0.02 a	99.2 ± 0.22 a
Ojo de Agua	99.8 ± 0.05 a	100.0 ± 0.00 a	99.8 ± 0.05 a	99.6 ± 0.16 a
Cumbre de Muridores	100.0 ± 0.00 a	99.8 ± 0.14 a	100.0 ± 0.00 a	99.8 ± 0.14 a
Ejido Beristáin	100.0 ± 0.00 a	99.5 ± 0.18 a	99.4 ± 0.15 a	99.5 ± 0.18 a
Tierra Blanca	100.0 ± 0.00 a	97.1 ± 0.81 a	100.0 ± 0.00 a	97.1 ± 0.81 a
La Cruz Verde	100.0 ± 0.00 a	100.0 ± 0.00 a	99.9 ± 0.05 a	100.0 ± 0.00 a
El Reparó	100.0 ± 0.00 a	100 ± 0.22 a	100.0 ± 0.00 a	99.5 ± 0.22 a
La Selva	100.0 ± 0.00 a	100 ± 0.36 a	100.0 ± 0.00 a	99.3 ± 0.36 a

[¶]Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

Interacción sitio por procedencia

La interacción sitio por procedencia fue significativa para la altura (p=0.04) y para el diámetro (p=0.01), lo que significa que las poblaciones de *P. patula* estudiadas muestran un crecimiento diferencial de acuerdo al sitio de plantación (Figura 3-1, Figura 3-2).

Xonocuautila, la procedencia de clima más frío y seco, presento cercanamente igual crecimiento en altura en los sitios. Situación similar se identificó en *Pinus ponderosa* y otras especies forestales (Martínez-Berdeja *et al.*, 2019). Por lo que, algunos autores sugieren que las poblaciones de mayor altitud no son capaces de aprovechar los sitios

con una estación de crecimiento más larga, o que muestran menor plasticidad en esta característica (Martínez-Berdeja *et al.*, 2019).

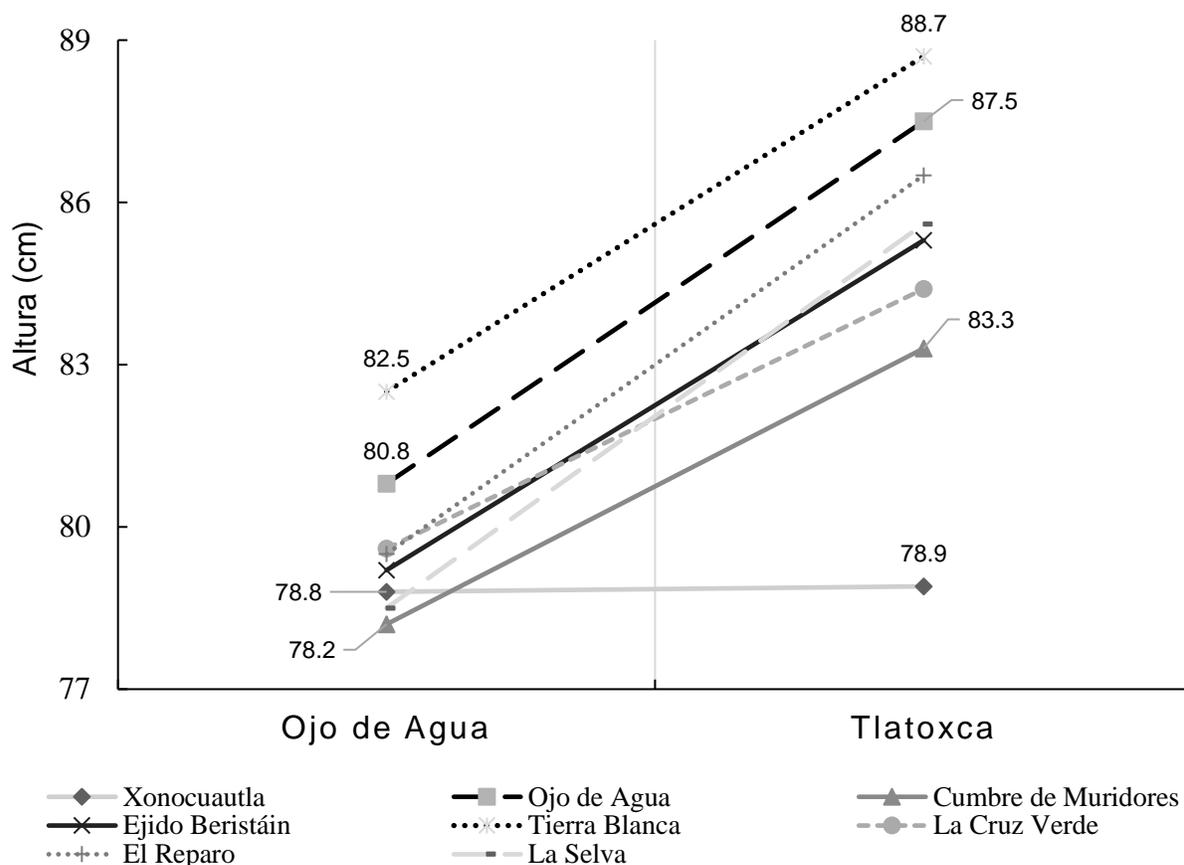


Figura 3-1. Crecimiento medio en altura (cm) de plantas de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación a 15 meses de establecimiento en campo.

El menor crecimiento en altura que presentaron las poblaciones en Ojo de Agua, evidencia la importancia de la selección de ambientes y de genotipos acordes para aumentar la adaptación y productividad en el programa de mejora (Cambrón-Sandoval *et al.*, 2013). Se estima, por ejemplo, que el movimiento de procedencias de sitios de menor elevación (Tierra Blanca, El Reparó, La Cruz Verde y la Selva) a un sitio de mayor altitud

repercute en disminución del crecimiento (Castellanos-Acuña, 2013) en este caso fue de aproximadamente 8 %, en esta etapa de la plantación. Mediciones posteriores podrían arrojar resultados diferentes, dado que se espera mayor diferenciación de las poblaciones una vez que inicie el cierre de copas.

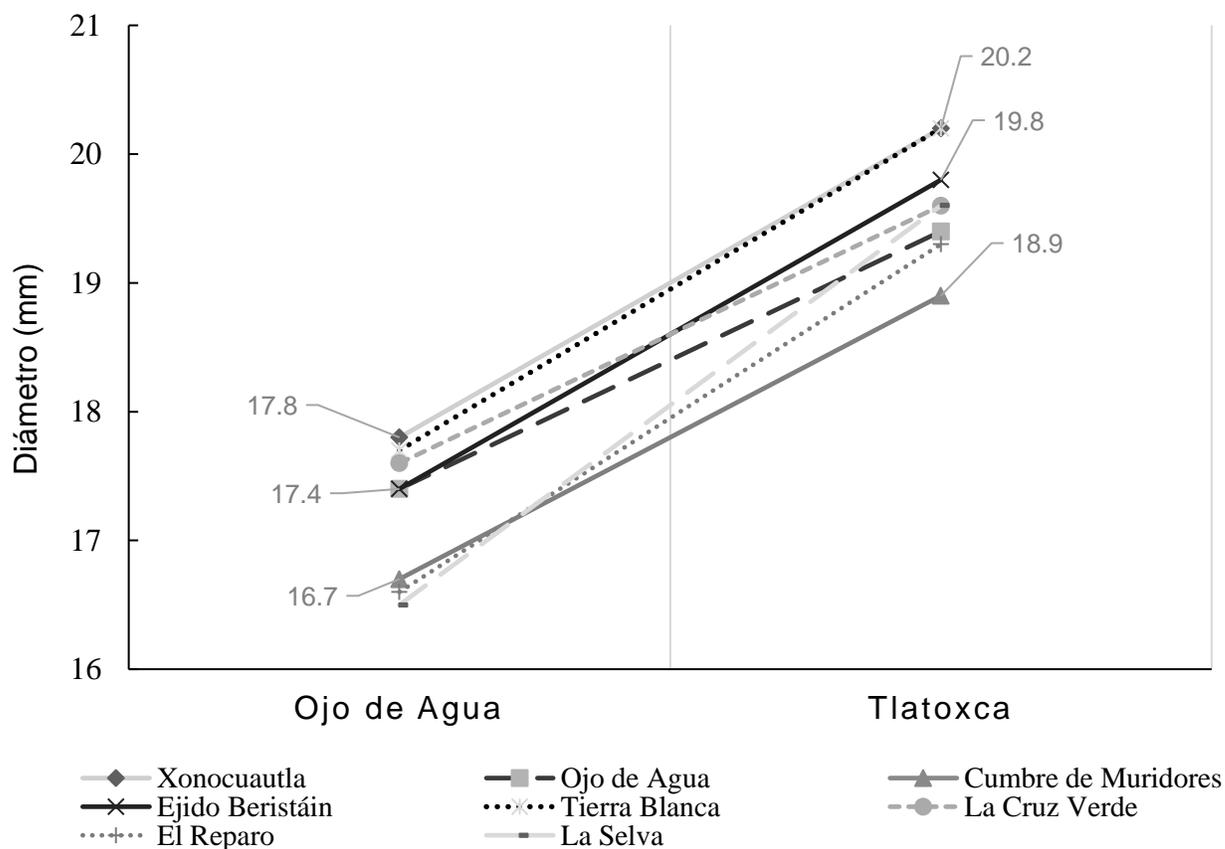


Figura 3-2. Crecimiento promedio en diámetro (mm) de plantas de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación a 15 meses de establecimiento en campo.

Relación del crecimiento con características del sitio de origen

En Ojo de Agua no se identificó relación significativa ($p \leq 0.05$) entre crecimiento y las variables climáticas (Cuadro III-6). En Tlatoxca, se encontró un patrón significativo ($p \leq 0.1$)

entre la altura de las plantas y los factores climáticos del sitio de origen (Figura 3-3) en el que a menor precipitación y temperatura menor crecimiento en altura. Para el caso del diámetro no se encontró asociación significativa ($p \leq 0.1$). El que se haya encontrado un patrón de variación en el sitio de menor elevación se puede atribuir a las condiciones más cálidas y de mayor humedad, ya que ante estas condiciones las plantas pueden expresar en mejor medida su potencial de crecimiento (Ruíz-Talonia *et al.*, 2014).

Cuadro III-6. Relación de altura y diámetro con variables climáticas del sitio de origen de ocho poblaciones de *Pinus patula*.

Característica/sitio	Ojo de Agua		Tlatoxca	
	Temperatura	Precipitación	Temperatura	Precipitación
Altura	p=0.34	p=0.57	p=0.07	p=0.09
Diámetro	p=0.71	p=0.23	p=0.67	p=0.42

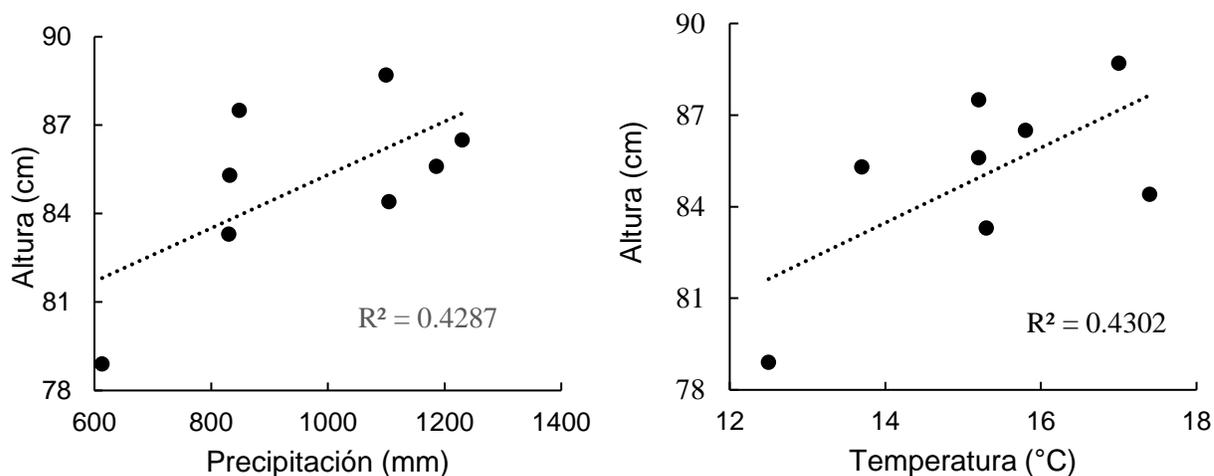


Figura 3-3. Relación de la altura de las plantas con la precipitación y temperatura de los sitios de origen de ocho poblaciones de *Pinus patula* de la región centro de su distribución

En el capítulo II del presente trabajo, se identificó que las semillas de *P. patula* de sitios de mayor altitud emergen con mayor rapidez en comparación con poblaciones de menor altitud. En procedencias de *P. patula* de Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tlaxcala y Querétaro se encontró relación negativa entre crecimiento en altura y la altitud de origen, a los 2.5 años de edad (Salazar *et al.*, 1999), similar a lo que se encontró en el presente trabajo.

Sin embargo, los patrones no siempre son consistentes entre regiones (Clair and Jhonson, 2004). En Ixtlán, Oaxaca, el crecimiento en altura presenta una relación cuadrática con la altitud (plantas de 36 meses de edad) (Ruiz-Talonia *et al.*, 2014), en donde las procedencias de altitud intermedia mostraron el mejor desempeño. En este último trabajo, además de que es una región diferente a la del presente trabajo, las poblaciones comprenden un área de estudio más pequeña, lo que también repercute en la identificación de patrones de variación (Rehfeldt *et al.*, 2014).

La población de Tierra Blanca sobresalió en crecimiento en los dos sitios. Este resultado coincide con lo planteado en otros trabajos, en donde las plantas provenientes de áreas con condiciones más cálidas y húmedas son las que presentan mayor crecimiento (Loya-Rebollar *et al.*, 2013). Por el contrario, las plantas de Xonocauatla tuvieron el menor desempeño en altura, pero al mismo tiempo crecimiento sobresaliente en diámetro en los dos sitios (Cuadro III-3, Cuadro III-IV), lo que podría considerarse una adaptación que les permite sobrevivir en ambientes fríos, principalmente durante los primeros años de edad de la planta (Vitasse *et al.*, 2009).

3.6. Conclusiones

Las poblaciones mostraron diferencias en el crecimiento en campo, siendo el sitio de menor elevación donde alcanzaron mayor tamaño. La supervivencia fue uniforme entre poblaciones. Las plantas que provienen de sitios más fríos y secos fueron de menor tamaño en altura en comparación con las poblaciones de sitios más cálidos y húmedos. En el diámetro no se encontró un patrón de variación.

3.7. Recomendaciones

Se sugiere hacer evaluaciones posteriores para identificar si el patrón es consistente con otras características o en diferentes edades. Además, incluir un mayor número de poblaciones para dar mayor certeza al patrón encontrado.

3.8. Literatura citada

- Aguilera R. M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. (2016) Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con Sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7: 7-19, <https://doi.org/10.29298/rmcf.v7i34.79>.
- Andivia E., P. Villar-Salvador, J. A. Oliet, J. Puértolas, R. K. Dumroese, V. Ivetic, R. Molina-Venegas, E. C. Arellano, G. Li y J. F. Ovalle (2021) Climate and species stress resistance modulate the higher survival of large seedlings in forest restorations worldwide. *Ecological applications* 31: 1-11, <https://doi.org/10.1002/eap.2394>
- Butnor J. R., B. M. Verrico, K. H. Johnsen, C. A. Maier, V. Vankus and S. R. Keller (2019) Phenotypic variation in climate-associated traits of red spruce (*Picea subens* Sarg.) along elevation gradients in the Southern Appalachian Mountains. *Castanea* 84:128-143, <https://doi.org/10.2179/0008-7475.84.2.128>
- Castellanos-Acuña D., C. Sáenz-Romero, R. Lindig-Cisneros, N. 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. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 3:399-411, <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.02.007>
- Clair S. B. and R. Jhonson (2004) Structure of genetic variation and implications for the management of seed and planting stock. In: Riley L. E., K. R. Dumroese, T.D. Landis, coords. *Forest and Conservation Nursery Associations—2003*; Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 33 p.

- Dixit A. and T. Kolb (2020) Variation in seedling budburst phenology and structural traits among southwestern ponderosa pine provenances. *Canadian Journal Forest Research* 50: 872-879, <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0333>
- Flores C., J. López U. y S. Valencia M. (2014) Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Comisión Nacional Forestal. Jalisco, México. 152 p.
- Flores G. A. y G. Moctezuma-López (2021) Cosecha de madera de 20 coníferas en zonas de movimiento de germoplasma. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12: 122-140.
- Fuentes-Amaro S. L., R. Rodríguez-Laguna, R. Razo-Zarate, J. Meza-Rangel y G. A. López-Zepeda (2021) Variación en emergencia y crecimiento de poblaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Fitotecnia Mexicana* 44: 655-660, <https://doi.org/10.35196/rfm.2021.4.655>
- INEGI, Instituto Nacional de Geografía e Informática (2019) Marco geoestadístico del INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825192242> (Consultado: agosto 2021).
- Loya-Rebollar E., C. Sáenz-Romero, R.A. Lindig-Cisneros, P. Lobit, J. A. Villegas-Moreno and N. M. Sánchez-Vargas (2013) Clinal variation in *Pinus hartwegii* populations and its application for adaptation to climate change. *Silvae Genetica* 62: 86-95, <https://doi.org/10.1515/sg-2013-0011>
- Martínez-Berdeja A., J. A. Hamilton, A. Bontempsa, J. Schmitta and J. W. Wright (2019) Evidence for population differentiation among Jeffrey and Ponderosa pines in survival,

growth and phenology. *Forest Ecology and Management* 434:40-48, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.12.009>

Nyoka B. I. (2002) *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. In: CAB International (comp). *Pines of Silvicultural Importance*. London, UK. CABI Publishing. p. 303-316.

Perry J. P. (1991) *The pines of México and Central America*. Timber Press, Inc. Portland, Oregon. USA. 231 p.

Rehfeldt G. (1993) Genetic variation in the ponderosa of the southwest. *American Journal of Botany* 80: 330-343.

Rehfeldt G., L. P. Leites, J. B. St Clair, B. C. Jaquish, C. Sáenz-Romero, J. López-Upton and D. G. Joyce (2014) Comparative genetic responses to climate in the varieties of *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii*: clines in growth potential. *Forest Ecology and Management* 324: 138-146, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.02.041>

Ruíz-Talonia F. L., N. M. Sánchez-Vargas, J. S. Bayuelo-Jiménez, S. I. Lara-Cabrera and C. Sáenz-Romero (2014) Altitudinal genetic variation among native *Pinus patula* provenances: performance in two locations, seed zone delineation and adaptation to climate change. *Silvae Genetica* 63: 139-149, <https://doi.org/10.1515/sg-2014-0019>

Salazar G. J., J. Vargas H., J. Jasso M., J. Molina G., C. Ramírez H. y J. López U. (1999) Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5 (2): 19-34.

SAS Institute (2002) SAS[®]/STAT 9.0. SAS Institute. Cary, North Carolina. USA.

Vitasse Y., S. Delzon, C. Bresson, R. Michalet and A. Kremer (2009) Altitudinal differentiation in growth and phenology among populations of temperate-zone tree species growing in a common garden. *Canadian Journal Forest Research* 39: 1259-1269, <https://doi.org/10.1139/X09-054>

Viveros-Viveros H., C. Sáenz-Romero, J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez-Valverde and A. Santacruz-Varela (2009) Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl.: I. Height growth, shoot phenology and frost damage in seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

Ye T.Z. and Jayawickrama (2014) Geographic variation and local growth superiority for Coastal Douglas-fir-rotation-age growth performance in a Douglas-fir provenance test. *Silvae Genetica* 63:116-125, <https://doi.org/10.1515/sg-2014-0016>

White T. L., W. T. Adams and B. D. Neale (2007) *Forest Genetics*. CAB International. Oxford, UK. 682 p.

CAPITULO IV.

Fenología del brote terminal de poblaciones de *Pinus patula*

Resumen

El adecuado manejo de los recursos genéticos requiere conocer los patrones de variación genética de la especie de interés. El objetivo fue identificar si existen diferencias en la fecha de inicio de crecimiento y en el avance fenológico del brote, así como si dichas discrepancias están relacionadas con las diferencias geográficas y de temperatura del sitio de origen de las poblaciones. Se colectó semilla de 52 árboles de ocho poblaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. de Hidalgo, Veracruz y Puebla. Se sembró en envases de polietileno en vivero. Posteriormente se establecieron dos ensayos, uno, en Rancho Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo.; y otro en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. Los resultados indican diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre sitios y dentro de cada sitio. Las plantas activaron el brote con anticipación y mostraron mayor avance en el desarrollo del brote en Tlatoxca. Las poblaciones que iniciaron el crecimiento con anticipación fueron Xonocuautila y Tierra Blanca en Tlatoxca y Ojo de Agua, respectivamente. las plantas de Tierra Blanca activaron el brote con anticipación mientras que las plantas de La Selva fueron las más tardías. Las variables fenológicas no mostraron un patrón de variación definido con los factores geográfico-ambientales.

Palabras clave: recursos genéticos, ensayos de progenie, procedencia, fenología del brote.

Abstract

Suitable management of genetic resources requires to know the patterns of genetic variation of the species of interest. Seed was collected from 51 trees from eight *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. populations from Hidalgo, Veracruz and Puebla. It was sown in polyethylene containers in the nursery. Subsequently, two progeny trials were established. One of them in Rancho Tlatoxca, Zacualtipán, Hgo, and the other in Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver. The objective was to identify if there are differences in the date of the beginning of growth and if these discrepancies are related to the geographical and temperature differences of the place of origin of the populations; as well as to identify the differences in the phenological development of the shoot at the beginning of spring. The results indicate statistical differences ($p \leq 0.05$) between sites and within each site. The plants activated the outbreak earlier and showed greater progress in the development of the outbreak in Tlatoxca. The populations that began growth early were Xonocuautila and Tierra Blanca in Tlatoxca and Ojo de Agua, respectively. The plants from Tierra Blanca activated the outbreak earlier, while the plants from La Selva were the latest. The phenological variables did not show a defined pattern of variation with the geographic-environmental factors.

Key words: genetic resources, progeny testing, provenance, shoot phenology.

4.1. Introducción

En las especies forestales de clima templado, los eventos fenológicos, como el inicio y fin del crecimiento, son optimizados para maximizar la longitud de la estación de crecimiento, al mismo tiempo que se minimiza el riesgo de daño por heladas (Basler and Korner., 2014). En las coníferas, una vez formada la yema terminal (a finales del otoño), las plantas entran en una etapa de reposo invernal. Para romper dicha dormancia se necesita cierto número de días con bajas temperaturas (menores a 10°C) y fotoperiodo corto. Inmediatamente después requieren de varias semanas con temperatura mayor de 5°C y mayor cantidad de horas luz. Los requerimientos de cada componente varían en función de la especie (Hannerz *et al.*, 2003; Basler and Korner, 2012).

Se reconoce que, las plantas con bajos requerimientos de horas de frío necesitan mayor acumulación de calor para emitir el brote y viceversa, y que el tiempo necesario para emitir el brote decrece con el incremento de la exposición al frío (Nanninga *et al.*, 2017). La variación en la fecha de inicio de crecimiento es el resultado de una interacción compleja entre características genéticas y condiciones ambientales del sitio de crecimiento (latitud, altitud) (Dhar *et al.* 2015) e incluso la historia de vida (pionera o tardía) de cada especie en particular (Basler and Korner, 2012).

La temperatura y el fotoperiodo disminuyen conforme aumenta la altitud y latitud respectivamente. Por lo que estos factores geográficos se han relacionado con la fecha de inicio del crecimiento en las coníferas. Uno de los patrones que se ha identificado, muestra que poblaciones que se localizan más al Norte o a mayor altitud comienzan el crecimiento del brote de manera más temprana en comparación con poblaciones del Sur o de menor elevación (Malmqvist *et al.*, 2017). En coníferas la activación del brote

terminal se puede considerar como el inicio de la estación de crecimiento (Malmqvist *et al.*, 2017).

El manejo de los recursos genéticos requiere conocer los patrones de variación intraespecífica (White *et al.*, 2007), los cuales permiten definir lineamientos para el movimiento de germoplasma (Dhar *et al.*, 2015). En poblaciones de *P. patula* de Oaxaca se han identificado patrones de variación que permitieron proponer zonas semilleras (Sáenz-Romero, 2011). Sin embargo, para las poblaciones del centro del país se tiene escasa información.

4.2. Objetivo

Determinar la variación en la fecha de inicio de crecimiento y en el avance fenológico del brote terminal de ocho poblaciones de *P. patula* en un ensayo de progenies ubicado en dos sitios; y relacionar dichas variables con factores geográficos y la temperatura del sitio de origen de las poblaciones para identificar un posible patrón de variación.

4.3. Hipótesis

P. patula se distribuye sobre un amplio rango altitudinal y latitudinal en la Sierra Madre Oriental, lo que sugiere que las poblaciones se enfrentan a diferentes presiones de selección. En el presente trabajo, las poblaciones de mayor altitud se encuentran al sur de la región de estudio y las de menor elevación se encuentran al norte. Tomando en cuenta que la activación de la yema terminal es un proceso que involucra tanto características genéticas como ambientales, se espera que existan diferencias entre las poblaciones en las fechas de inicio de crecimiento y en el avance fenológico del brote

terminal; y que las poblaciones de sitios de menor temperatura promedio inicien el crecimiento antes que las poblaciones de sitios más cálidos.

4.4. Metodología

Colecta y siembra de semilla

Se obtuvo semilla de polinización libre de 52 árboles distribuidos en Puebla, Hidalgo y Veracruz en 2018 (Cuadro IV-1). La colecta se realizó en árboles sanos, de fuste recto, de altura y diámetro sobresaliente, a por lo menos 100 m de distancia entre ellos. La siembra se realizó en diciembre de 2018. En lo sucesivo, el término “procedencia” se utilizará para referirse a la localidad de origen y “población” se refiere a la progenie derivada del conjunto de individuos de cada procedencia.

Establecimiento en campo

En septiembre de 2019 se estableció el ensayo con plantas de 9 meses de edad en el rancho Tlatoxca ubicado en Zacualtipán, Hidalgo. El segundo ensayo se estableció en Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz en octubre del mismo año. En ambos sitios se utilizó un diseño de bloques completamente al azar y parcelas de un solo árbol por familia. En Tlatoxca se establecieron 20 bloques y en Ojo de Agua 21, por lo que el número de plantas fue de 1040 y 1092 respectivamente. El método de plantación utilizado fue cepa común en marco real, la distancia entre individuos fue de 3x3 m; además, se plantó una hilera de árboles como franja de protección en el perímetro de cada ensayo. Para la evaluación de la fenología del brote se evaluaron las plantas de 10 bloques en cada uno de los ensayos, es decir, 520 en Zacualtipán y 546 en Ojo de Agua.

El Rancho Tlatoxca se ubica a 1993 m de altitud, con clima templado-húmedo con abundante lluvia en verano (1500 mm), temperatura promedio entre 16 y 20 °C, el tipo de suelo es regosol. El sitio de Ojo de Agua se encuentra a 2310 m de elevación, presenta clima templado húmedo con abundante lluvia en verano (1100 mm), temperatura promedio entre 12 y 18 °C y suelo tipo luvisol (INEGI, 2019).

Cuadro IV-1. Localidades y número de árboles de *Pinus patula* seleccionados en poblaciones de la región centro de su distribución natural.

Localidad	Municipio	Entidad	Núm. Árboles	Altitud (msnm)	Temp. ^z (°C)	Ppt. ^y (mm)
Xonocuatla	Tlatlahuquitepec	Puebla	8	2579	12.5	613
Ojo de Agua	Huayacocotla	Veracruz	8	2532	15.2	848
Cumbre de Muridores	San Bartolo	Hidalgo	5	2361	15.0	830
Ejido Beristain	Beristain	Puebla	8	2342	13.7	832
Tierra Blanca	Metztitlán	Hidalgo	3	2157	16.0	1100
La Cruz Verde	Metztitlán	Hidalgo	5	2136	17.4	1105
El Reparó	Zacualtipán	Hidalgo	7	2068	15.8	1230
La Selva	Huayacocotla	Veracruz	8	1959	15.5	1186
Total			52			

^zTemp: temperatura promedio, ^yPpt: precipitación anual.

Variables evaluadas

Para la evaluación de la fenología del brote se utilizó la escala de Acevedo *et al.*, (2006) con algunas modificaciones: (0) yema en reposo, (1) yema hinchada, 2) brote terminal en crecimiento, pero sin acículas, 3) brote terminal con acículas. La evaluación se realizó en cuatro ocasiones, una vez por semana, del 26 de febrero al 20 de marzo de 2021 en cada uno de los sitios.

El inicio del crecimiento se definió como la fecha en días julianos en que cada planta presentó nuevo follaje (etapa fenológica 3) (Salmela *et al.*, 2013). El nivel de desarrollo fenológico del brote, se evaluó asignando el valor de 1 a las plantas que presentaban desarrollo avanzado (fase 3) y 0 a las plantas que presentaban desarrollo inicial (fase 2 o menor) para el día 13 de marzo. Con estos datos se estimó la proporción de plantas con desarrollo avanzado del brote por población.

Análisis de datos

Tanto para la fecha de inicio de crecimiento y porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote, se realizó análisis de varianza con el procedimiento GLM de SAS (2002) con el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + P_j + E_{ij} \dots \dots \dots (1)$$

En donde: μ es la media general de la población, B_i es el i -ésimo bloque, P_j es j -ésima procedencia y E_{ij} es el error experimental. Al encontrar diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) se realizó prueba de medias de Tukey. Además, previo al análisis estadístico, se verificó la normalidad de los datos. En el caso de la variable porcentaje de plantas con desarrollo

avanzado del brote, los datos se transformaron con la función arcoseno previo al análisis estadístico para que cumplieran con el supuesto de normalidad.

Se utilizó análisis de regresión con la opción PROCREG de SAS (2002) para relacionar el valor promedio de las variables fenológicas por población con la altitud, latitud y temperatura promedio del sitio de origen.

4.5. Resultados y discusión

Inicio de crecimiento

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) en cuanto al número de días promedio en que las plantas iniciaron el crecimiento en cada sitio. En Tlatoxca el crecimiento comenzó en promedio, a los 65 días julianos, mientras que en Ojo de Agua inició en el día 70. La menor temperatura promedio en Ojo de Agua, podría explicar las diferencias entre los sitios. Un patrón similar se presentó en el desarrollo del brote terminal de *Fagus sylvatica* L. y otras seis especies forestales de clima templado, en las que la emergencia de las hojas se retrasó conforme aumentó la altitud de los sitios de evaluación, lo que refleja la plasticidad a nivel de especie (Vitasse *et al.*, 2013).

A nivel de sitio, se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre poblaciones (Cuadro IV-2), tal y como se encontró en otras especies (Dhar *et al.*, 2015). La diferencia entre la procedencia más temprana y más tardía, fue de 7.9 días en Ojo de Agua, mientras que esta diferencia fue de 3.1 días en Tlatoxca. Esto implica, que las plantas de las distintas poblaciones ajustaron la fecha de inicio de crecimiento de acuerdo al sitio donde se plantaron.

Las discrepancias entre poblaciones pueden ser debido a diferentes requerimientos de frío, temperatura o diferencias en cuanto a la sensibilidad al fotoperiodo (Vitasse *et al.*, 2013). En Ojo de Agua las plantas de El Reparó y La Selva comenzaron a crecer de forma tardía en comparación con las otras poblaciones porque posiblemente necesiten de un mayor número de días con temperaturas cálidas. Mientras que las plantas de Tierra Blanca iniciaron el crecimiento con anticipación, lo que puede estar relacionado con el fotoperiodo, ya que se reconoce que cuando este aumenta, decrece la temperatura umbral requerida para iniciar la activación de la yema (Basler y Korner, 2014).

Cuadro IV-2. Número de días julianos para iniciar el crecimiento en plantas de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación.

Población/Sitio	Ojo de Agua	Tlatoxca
Xonocuautila	70.7 ± 0.40 b [¶]	63.8 ± 0.63 b
Ojo de Agua	68.6 ± 0.63 bc	66.1 ± 0.72 ab
Cumbre de Muridores	69.4 ± 0.81 bc	65.0 ± 0.98 ab
Ejido Beristáin	68.0 ± 0.36 c	65.1 ± 0.84 ab
Tierra Blanca	65.2 ± 1.05 d	65.0 ± 1.00 ab
La Cruz Verde	69.2 ± 0.88 bc	65.4 ± 0.92 ab
El Reparó	73.1 ± 0.53 a	65.5 ± 0.65 ab
La Selva	72.2 ± 0.35 a	66.9 ± 0.77 a

[¶]Letras iguales en las columnas indica que no existen diferencias estadísticas (Tukey, 0.05).

En Tlatoxca fueron menos evidentes las diferencias en la fecha de inicio del crecimiento entre poblaciones, lo que pudiera ser resultado de las condiciones ambientales menos

homogéneas del sitio, lo que origina mayor variación dentro de bloques. Aunado a lo anterior, *P. patula* muestra amplia plasticidad (Dvorak *et al.*, 2000).

Desarrollo fenológico del brote

Se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre sitios en el porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote para el día 13 de marzo de 2021, que en promedio fue de 90.0 % en Tlatoxca, y en Ojo de Agua de 72.0%. En la primera semana de evaluación en Ojo de Agua el 27 % de las plantas aún permanecía en dormancia; en contraste con el 4.5 % en Tlatoxca. Para la segunda semana (6 de marzo) aún el 4.6 % de las plantas permanecían en dormancia en Ojo de Agua; sin embargo, en Tlatoxca el 100 % de las plantas habían comenzado el desarrollo del brote.

A nivel de sitio, se encontraron diferencias estadísticas ($p \leq 0.05$) entre poblaciones en Ojo de Agua, contrario a lo que se encontró en Tlatoxca (Figura 4-1). En *Pinus hartwegii* Lindl. también se encontraron diferencias entre poblaciones para esta característica (Viveros-Viveros *et al.*, 2009). En Ojo de Agua, las plantas de Tierra Blanca, Ejido Beristáin y Ojo de Agua presentaron brotes con mayor avance de desarrollo, derivado de que iniciaron el crecimiento con anticipación. De manera similar, El Reparó y La Selva que comenzaron a crecer de manera tardía mostraron menor porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote.

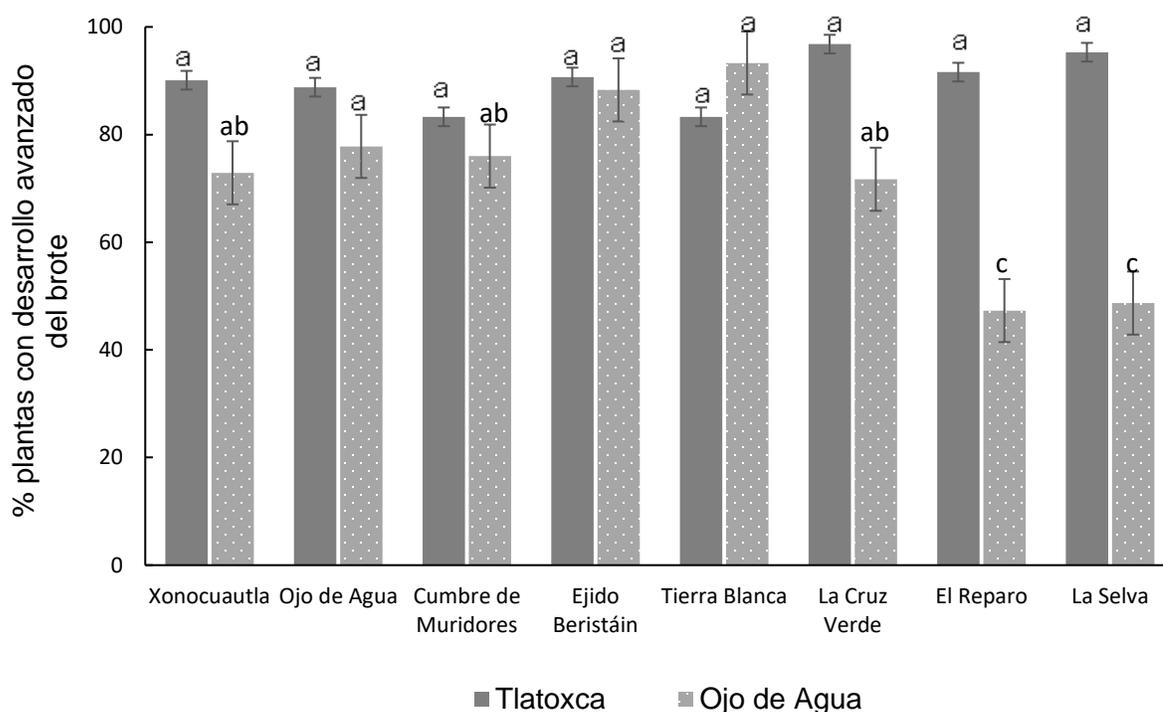


Figura 4-1. Porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote en ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de plantación. Letras diferentes en las barras indican diferencias estadísticas. Tukey, ($p \leq 0.05$).

Relación de la fenología con factores geográficos

No se encontró relación significativa ($p \leq 0.05$) entre las variables fenológicas y los factores geográficos y la temperatura del sitio de origen (Cuadro IV-3, Cuadro IV-4). Aunque la altitud del sitio de plantación probablemente influyó en la fecha de inicio de crecimiento y en el desarrollo fenológico del brote (por la diferencia de temperatura) a nivel de sitio, este factor geográfico no mostró un patrón significativo ni consistente entre poblaciones a nivel de sitio.

Sin embargo, fue evidente que la población de menor altitud (La Selva) requirió de más días para iniciar el crecimiento. Por otro lado, la población ubicada más al Norte (Tierra Blanca) y la población de mayor altitud (Xonocuautila) emitieron el brote con anticipación.

Lo anterior coincide con lo que se ha reportado para poblaciones de *Pinus sylvestris* L., *Pinus uncinata* Ramond y *Pinus mugo* Turro s.l., en donde tanto la latitud como la altitud de origen de las poblaciones influye en el tiempo de emisión del brote (Wachowiak et al, 2018).

Cuadro IV-3. Relación entre la fecha de inicio de crecimiento y características del sitio de origen de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de plantación

	Ojo de Agua		Tlatoxca	
	p	r ²	p	r ²
Altitud	0.565	0.014	0.133	0.330
Latitud	0.496	0.057	0.136	0.329
Temperatura	0.778	0.080	0.234	0.221

Cuadro IV-4. Relación del porcentaje de plantas con desarrollo avanzado del brote con las características del sitio de origen de ocho poblaciones de *Pinus patula* en dos sitios de plantación.

	Ojo de Agua		Tlatoxca	
	p	r ²	p	r ²
Altitud	0.194	0.26	0.341	0.151
Latitud	0.922	0.00	0.952	0.000
Temperatura	0.738	0.02	0.635	0.041

4.6. Conclusiones

Las poblaciones de *P. patula* difieren en la fecha de inicio de crecimiento y en el avance fenológico del brote. Las plantas activaron el brote con anticipación y mostraron mayor avance en el desarrollo del brote en el sitio más cálido. El inicio del crecimiento y el desarrollo fenológico del brote no mostraron un patrón de variación definido respecto a las características geográfico ambientales del sitio de origen.

4.7. Recomendaciones

Se recomienda continuar evaluando el año siguiente para identificar la repetibilidad de las características evaluadas.

4.8. Literatura citada

Acevedo- Rodríguez R., J. J. Vargas-Hernández, J. López-Upton y J. Velázquez M.

(2006) Efecto de la procedencia geográfica y de la fertilización en la fenología del brote terminal en plántulas de *Pseudotsuga* sp. *Agrociencia* 40: 125-137.

Basler D. and C. Korner (2014) Photoperiod and temperature responses of bud swelling and bud burst in four temperate forest tree species. *Tree Physiology* 34: 377-388, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpu021>

Basler D. and C. Korner (2012) Photoperiod sensitive of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology* 165: 73–81, <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.001>

- Dhar A., N. Balliet, C. DB Hawkins, M. R. Carlson, V. G. Berger and R. Mahoney (2015) Bud flush phenology and nursery carryover effect of paper birch provenances. *IForests*: 1-9, <https://doi.org/10.3832/ifor1367-008>
- Dvorak W. S., G. Hodge, J. Kietzka, F. Malan, L. Osorio and T. Stanger (2000) *Pinus patula*. In: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative. Raleigh: College of Natural Resources, North Carolina State University. pp 148–173.
- Hannerz M., I. Ekberg and L. Norell (2003) Variation in chilling requirements for completing bud rest between provenances of Norway spruce. *Silvae Genetica* 52: 161-168.
- Hernández M. (2015) Estimación de parámetros genéticos y selección de genotipos de *Cedrela odorata* L. en un ensayo de procedencias-progenies. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados Campus Montecillos. Montecillos, Texcoco, Méx. 56 p.
- Howe G.T., Aitken, S.N., Neale, D.B., Jermstad, K.D., Wheeler, N.C., Chen, T.H. (2003) From genotype to phenotype: unraveling the complexities of cold adaptation in forest trees. *Canadian Journal of Botany* 81(2): 1247–1266.
- INEGI, Instituto Nacional de Geografía e Informática (2019) Marco geoestadístico del INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825192242> (Consultado: agosto 2021).

- Lanner, R. M. (1976) Patterns of shoot development in *Pinus* and their relationship to growth potential. En M. G. R. Canell y F. T. Last (Eds.), *Tree physiology and yield improvement* (pp. 223-243). New York: Academic Press.
- Malmqvist C., E. Wallin, A. Lindstrom and H. Sall (2017) Differences in bud burst timing and bud freezing tolerance among interior and coastal seed sources of Douglas fir. *Trees* 31: 1987-1998, <https://doi.org/10.1007/s00468-017-1603-x>
- Nanniga C., C. Buyarski, A. M. Pretorius, R. A. Montgomery (2017) Increased exposure to chilling advances the time to budburst in North American tree species. *Tree Physiology* 37: 1727–1738, <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx136>
- Sáenz-Romero C., L. Ruiz-Talonia, J. Beaulieu, N. Sánchez-Vargas, G. Rehfeldt (2011) Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34:19-25.
- Salmela M. J., S. Cavers, J. Cottrell, G. Iason and R. A. Ennos (2013) Spring phenology shows genetic variation among and within populations in seedlings of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Scottish Highlands. *Plant Ecology & Diversity* 6: 523-536, <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.795627>
- SAS Institute (2002) SAS®/STAT 9.0. SAS Institute. Cary, North Carolina. USA.
- Viveros-Viveros H., C. Sáenz-Romero, J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, G. Ramírez-Valverde and A. Santacruz-Varela (2009) Altitudinal genetic variation in *Pinus hartwegii* Lindl.: I. Height growth, shoot phenology and frost damage in

seedlings. *Forest Ecology and Management* 257: 836-842,

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.10.021>

Vitasse Y., G. Hoch, C. Randin, A. Lenz, C. Kollas, J. F. Scheppens and C. Korner (2013)

Elevational adaptation and plasticity in seedling phenology of temperate deciduous tree species. *Oecología* 171: 663-678, <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2580-9>

Wachowiak W., A. Perry, K. Donnelly and S. Cavers (2017) Early phenology and growth

trait variation in closely related European pine species. *Ecology and evolution* 8: 655-666, <https://doi.org/10.1002/ece3.3690>

White T. L., W. T. Adams and B. D. Neale (2007) *Forest Genetics*. CAB International.

Oxford, UK. 682 p.

CAPITULO V.

Parámetros genéticos en dos ensayos de progenie de *Pinus patula*

Resumen

El mejoramiento genético de las especies forestales requiere de grandes periodos de tiempo por lo cual se recurre a la selección temprana, que es una técnica que permite acortar el tiempo del ciclo de mejora. Para utilizar dicha técnica se requiere estimar parámetros genéticos en etapa temprana. Por tal motivo, se evaluó el crecimiento de *P. patula* en Ojo de Agua (2300 m) y Tlatoxca (1993 m) y se estimaron parámetros genéticos. La heredabilidad individual de las características de crecimiento fue moderada en Ojo de Agua y baja en Tlatoxca. La heredabilidad de familias fue mayor en Ojo de Agua para las tres características. La heredabilidad de familias fue mayor que la heredabilidad individual. La altura fue la característica menos afectada por el ambiente de plantación ($r_B = 0.55$). El diámetro ($r_B=0.0$) y el número de verticilos ($r_B=0.41$) mostraron ser características más inestables entre los sitios. En Ojo de Agua las familias que provienen de árboles madre ubicadas en sitios de mayor elevación mostraron mayor crecimiento en diámetro. Para las otras características no se encontró relación con la altitud de origen del árbol madre.

Palabras clave: mejoramiento genético, selección temprana, ciclo de mejora, parámetros genéticos, heredabilidad.

Abstract

The genetic improvement of forest species requires long periods of time, therefore early selection is used, which is a technique that allows shortening the time of the improvement cycle. To use this technique, it is necessary to estimate genetic parameters at an early stage. Therefore, the growth of *P. patula* in Ojo de Agua (2300 m) and Tlatoxca (1993 m) was evaluated and genetic parameters were estimated. Individual heritability of growth characteristics was moderate in Ojo de Agua and low in Tlatoxca. Family heritability was higher in Ojo de Agua for all three traits. The heritability of families was higher than the individual heritability. Height was the least affected characteristic by the environment ($r_B = 0.55$). The diameter ($r_B=0.0$) and the number of whorls ($r_B=0.41$) were more unstable characteristics between the sites. In Ojo de Agua, the families that come from mother trees located in higher elevation sites showed greater growth in diameter. For the other characteristics, no relationship was found with the altitude of origin of the mother tree.

Keywords: genetic improvement, early selection, breeding cycle, genetic parameters, heritability.

5.1. Introducción

Pinus patula Schiede ex Schtdl. et Cham. se distribuye en mayor medida sobre la Sierra Madre Oriental, es una de las especies más importantes en la región oriental de México por su velocidad de crecimiento, fácil manejo y las características de su madera (Velázquez *et al.*, 2004) Con la finalidad de asegurar con un abasto suficiente de semilla de calidad, se inició en 2018 un programa de mejora genética de *P. patula*. con el propósito de establecer huertos semilleros ya que son la fuente más confiable para obtener germoplasma mejorado (White *et al.*, 2007).

En los ensayos se evalúa la calidad genética de los progenitores, a través de la evaluación del crecimiento de la progenie en los terrenos donde se establecerán las plantaciones (Zobel y Talbert, 1988). En este tipo de plantaciones se puede determinar el valor genético de los árboles inicialmente seleccionados y otros parámetros como la heredabilidad (Flores *et al.*, 2014), que es uno de los parámetros más usados, pues indica la proporción de variación que es atribuida a diferencias genéticas entre los individuos (Falconer y Mackay, 1996). En las especies forestales, la heredabilidad promedio para características de crecimiento es baja (0.24) (Cornelius, 1994). En *P. patula* para la altura se han reportado valores entre 0.14 y 0.22 en árboles de 5 a 8 años; en el caso del diámetro los valores son menores (0.13-0.18) (Dvorak, 2001).

Cuando los ensayos se establecen en varias localidades, en ocasiones se presenta un comportamiento diferencial entre las progenies de diferentes árboles, según el ambiente particular, conocido como interacción genotipo-ambiente. Tal interacción permite identificar la estabilidad de las familias, es decir la variabilidad de su desempeño en función del ambiente (White *et al.*, 2007). *P. patula* ha mostrado inestabilidad en

características de crecimiento en ensayos establecidos en otros países y en México (Dvorak, 2001; Gómez, 2013).

El costo de los ensayos aumenta conforme avanza la edad de los individuos, por lo que se recurre a la selección temprana, que consiste en evaluar, a una edad anticipada, características de manifestación precoz, y que dicho carácter este fuertemente correlacionado con un carácter de interés económico a edad madura (Flores *et al.*, 2014). Al identificar a las mejores familias a edad temprana se acorta el intervalo entre generaciones y así también el ciclo de reproducción (Pagliarini, 2016). En *Pseudotsuga menziesii* Mirb. la selección temprana, a partir de un año de edad, es útil para identificar a las peores familias, con lo que se estima un ahorro monetario del 18 % al establecer los ensayos (Adams *et al.*, 2001).

5.2. Objetivos

Objetivo general

Estimar parámetros genéticos en características de crecimiento de 64 familias de *P. patula* mediante la evaluación de un ensayo de progenies localizado en dos sitios, con la finalidad de generar información útil para la búsqueda de indicadores de selección temprana en etapas posteriores; así como determinar si existe un patrón de variación a nivel de familias para producir información para la toma de decisiones acerca del movimiento de germoplasma.

Objetivos específicos

- Estimar el control genético de características de crecimiento de 64 familias de *P. patula* establecidas en dos sitios.

- Evaluar las correlaciones fenotípicas y genéticas entre las variables de crecimiento de 64 familias de *P. patula*.
- Valorar la interacción genotipo-ambiente para las características de crecimiento e identificar las familias que más contribuyen en dicha interacción en los sitios de evaluación.
- Identificar si existe relación entre las variables de crecimiento y la altitud de origen de los árboles madre de plantas establecidas en dos ensayos de progenie.

5.3. Hipótesis

Dado que se evaluarán características de crecimiento se espera que el control genético de la altura y diámetro sea bajo, así también, se intuye que las familias muestren inestabilidad en los sitios de evaluación para dichas características. Al identificar a nivel de población, diferenciación en crecimiento relacionada con características del sitio de origen (Capítulo II), es probable que a nivel de familia se encuentre una relación similar con la altitud del sitio de origen de la semilla.

5.4. Metodología

Colecta y siembra de semilla

Durante los meses de mayo y junio de 2018, se obtuvo semilla de polinización libre de 64 árboles seleccionados en Puebla, Hidalgo y Veracruz (Cuadro V-1). La recolecta se realizó en individuos sanos, de fuste recto, con altura y diámetro sobresaliente, los cuales se encontraban a por lo menos 100 m de distancia entre ellos para evitar recolectar en árboles emparentados. La siembra se realizó en diciembre de 2018 en tubos rígidos de

polietileno negro de 310 cm³, dentro de invernadero. A los cinco meses las plantas se colocaron en un túnel con malla sombra al 50%.

Plantación

En septiembre de 2019 se estableció el ensayo con plantas de 9 meses de edad en el rancho Tlatoxca ubicado en Zacualtipán, Hidalgo. El segundo ensayo se estableció en Ojo de Agua en Huayacocotla, Veracruz en octubre del mismo año. En ambos sitios se utilizó un diseño de bloques completamente al azar y parcelas de un solo árbol por familia. En Tlatoxca se establecieron 20 bloques y en Ojo de Agua 21, por lo que el número de plantas fue de 1040 y 1092 respectivamente. El método de plantación utilizado fue cepa común en marco real, la distancia entre individuos fue de 3x3 m; además, se plantó una hilera de árboles como franja de protección en el perímetro de cada ensayo.

El Rancho Tlatoxca se ubica a 1993 m de altitud, con clima templado-húmedo con abundante lluvia en verano (1500 mm), temperatura promedio entre 16 y 20 °C, el tipo de suelo es regosol. El sitio de Ojo de Agua se encuentra a 2310 m de elevación, presenta clima templado húmedo con abundante lluvia en verano (1100 mm), temperatura promedio entre 12 y 18 °C y suelo tipo luvisol (INEGI, 2019).

VARIABLES EVALUADAS

En diciembre del año 2020 se midió altura, diámetro, número de verticilos y supervivencia en cada uno de los ensayos. La evaluación se hizo durante el invierno porque es la época en la que los árboles detienen su crecimiento (Greenwood, 1977). La altura se midió con una regla graduada en centímetros, desde la base del tallo hasta el ápice terminal. El diámetro se midió en la base del tallo, con un vernier marca Mitutoyo

en milímetros a tres centímetros del suelo. El número de verticilos se evaluó como el equivalente al número de ciclos de crecimiento. La supervivencia fue evaluada con “1” planta viva y “0” planta muerta.

Cuadro V-1. Localidad y número de familias de *Pinus patula* que se evaluaron en los ensayos de progenie.

Localidad	Estado	Fam.	Altitud (msnm)	Latitud	Longitud
Xonocuautla, Tlatlahuquitepec	Puebla	12	2554	19°46'08.0"	97°30' 37.5"
Nuevo Nanacamila, Zacatlán	Puebla	2	2457	20°04'06.4"	98°05'17.7"
Meza Chica, Ahuazotepec	Puebla	2	2361	20 03'21.2"	98°06'16.1"
Beristain, Ahuazotepec	Puebla	3	2351	20°05'02.7"	98°06'58.1"
La Cruz Verde, Metztitlán	Hidalgo	4	2140	20°39'55.7"	98°42'21.7"
El Reparó, Zacualtipán	Hidalgo	6	2067	20°37'41.1"	98°36'15.4"
La Selva, Huayacocotla	Veracruz	12	2013	20°32'05.9"	98°29'19.3"
Ojo de Agua, Huayacocotla	Veracruz	12	2457	20°27'01.0"	98°28'10.6"
La Cumbre, San Bartolo T.	Hidalgo	5	2361	20°20'48.9"	98°19'09.3"
Tierra Blanca, Tlahuiltepa	Hidalgo	3	2157	20°55'01.9"	98°55'59.8"
Alcotlán, Acaxochitlán	Hidalgo	1	2203	20°12'56.0"	98°11'51.3"
San Cornelio, Agua Blanca	Hidalgo	2	2245	20°21'55.1"	98°20'59.1"
Total		64			

Análisis de datos

Se realizó análisis de varianza por sitio para cada variable con el procedimiento GLM de SAS (2002) para identificar las diferencias entre familias. El procedimiento MIXED de SAS se utilizó para estimar los componentes de varianza con base en el algoritmo de máxima verosimilitud restringida (REML). El modelo utilizado fue:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + F_j + e_{ij} \quad (1)$$

En donde: Y_{ij} es la observación de la j -ésima familia en el i -ésimo bloque; μ es la media de la característica a evaluar; B_i es el efecto fijo del i -ésimo bloque, F_j es el efecto aleatorio de la j -ésima familia; y e_{ij} es el error experimental.

Se hizo además un análisis de varianza conjunto con el siguiente modelo para poder estimar la interacción genotipo-ambiente.

$$Y_{ijk} = \mu + S_i + B_j + F_k + SF_{ik} + e_{ijk} \quad (2)$$

En donde: Y_{ijk} es la observación de la k -ésima familia en el j -ésimo bloque en el i -ésimo sitio; μ es la media de la característica a evaluar; S_i es el efecto del i -ésimo sitio, B_j es el efecto del j -ésimo bloque, F_k es el efecto de la k -ésima familia, SF_{ik} es el efecto de la interacción sitio por familia; y e_{ijk} es el error experimental.

No se consideraron dentro del análisis árboles que no se desarrollaron en altura ni en diámetro, aquellos que no tenían la punta del brote principal y aquellos que tenían más de un brote líder, para evitar sesgos; por lo que se descartaron 29 y 37 individuos en Ojo de Agua y Tlatoxca respectivamente.

Estimación de parámetros genéticos

Con los componentes de varianza se estimó la heredabilidad en sentido estricto tanto a nivel individual (h^2_i) como de medias de familia (h^2_f) para las variables de crecimiento, para lo que se utilizó las ecuaciones descritas por Falconer y Mackay (1996):

$$h^2_i = \sigma^2_A / (\sigma^2_f + \sigma^2_e) \quad (3)$$

$$h^2_f = \frac{1}{4} \sigma^2_A / (\sigma^2_f + \sigma^2_e/n) \quad (4)$$

Donde: σ^2_A = varianza aditiva ($\sigma^2_A = 3 \sigma^2_f$), σ^2_f = varianza de familias, σ^2_e varianza del error, n = media armónica del número de plantas por familia en el ensayo. La media armónica fue de 19.9 y 16.5 para el ensayo de Ojo de Agua y para Tlatoxca respectivamente.

En el presente trabajo se evalúa la progenie de cada uno de los árboles seleccionados, por lo que las plantas derivadas de cada árbol son medios hermanos. De acuerdo con Falconer y Mackay (1996), en las familias de medios hermanos por árbol, el componente de varianza de familias representa $\frac{1}{4}$ de la varianza genética aditiva (σ^2_A). Esta aseveración supone que los padres no están emparentados y que la endogamia es cero, lo que generalmente no se cumple en especies forestales por lo que se considera que la correlación intraclase de hermanos obtenidos por polinización libre es mayor de $\frac{1}{4}$ (Squillace, 1974). Derivado de lo anterior, en el presente trabajo se empleó un coeficiente de determinación genética de 3 para el cálculo de la varianza genética aditiva, suponiendo que la correlación genética entre hermanos obtenidos por polinización libre es de 0.33 y así evitar la sobreestimación de la varianza aditiva (σ^2_A) y, por tanto, de la heredabilidad y de las ganancias genéticas esperadas (Namkoong, 1966).

Correlación genética y fenotípica

Se estimó la correlación genética y fenotípica entre la altura y el diámetro. La correlación fenotípica se estimó con el coeficiente de correlación de Pearson. La correlación genética (r_G) se estimó con la fórmula:

$$r_G = \sigma_{fXY} / \sigma_{fX}\sigma_{fY} \quad (5)$$

En donde: σ_{fXY} es la covarianza de familias entre las variables X e Y, σ_{fX} y σ_{fY} son la desviación estándar de familias para las variables X e Y, respectivamente. La covarianza σ_{fXY} se estimó con la siguiente fórmula:

$$\sigma_{fXY} = [\sigma^2_{f(X+Y)} - (\sigma^2_{fX} + \sigma^2_{fY})]/2 \quad (6)$$

Dónde: $\sigma^2_{f(X+Y)}$ es la varianza de familias de la variable X + Y, σ^2_{fX} y σ^2_{fY} son las varianzas de familias de las variables X e Y individualmente.

Para evaluar la interacción genotipo-ambiente se utilizó correlaciones genéticas tipo B con la ecuación propuesta por Yamada (1962):

$$r_B = \frac{\sigma_f^2}{\sigma_f^2 + \sigma_{sf}^2} \quad (6)$$

Donde: σ_f^2 es la varianza de familias y σ_{sf}^2 es la varianza de sitio*familia

Para determinar la contribución de cada familia a la interacción GxA y las familias más inestables se estimó la ecovalencia (W_i), que estima la aportación relativa de cada familia a la varianza de la interacción, con la siguiente formula (Wricke, 1962):

$$W_i = \sum_j (Y_{ij} - Y_{i.} - Y_{.j} + Y_{..})^2$$

Donde: W_i es la ecovalencia de la familia i , Y_{ij} es la media general de la familia i en el sitio j , $Y_{i.}$ y $Y_{.j}$ son la media general de la familia i y del sitio j respectivamente y $Y_{..}$ es la media general de la característica,

Las familias se ordenaron con base en su contribución a la interacción para cada variable, de acuerdo al valor de los parámetros de estabilidad estimados. Con tal información se evaluó el efecto de eliminar las familias más interactivas (10%) en la magnitud de los componentes de la varianza, en la heredabilidad y en la interacción genotipo-ambiente (r_B), con respecto a los resultados obtenidos al incluir todas las familias.

Además, se evaluó el desempeño de cada una de las familias en cada uno de los sitios en relación a la altitud del sitio de origen del árbol madre para lo que se utilizó la correlación de Pearson entre los valores medios por familia y la altitud.

5.5. Resultados y discusión

Parámetros genéticos

En Tlatoxca la heredabilidad individual fue baja y menor en comparación con Ojo de Agua (Cuadro V-2), lo que se atribuye a las condiciones ambientales más variables (Falconer y Mackay, 1996) de este sitio. Ojo de Agua presenta condiciones ambientales más uniformes. Cuando los experimentos de campo se establecen en sitios homogéneos, las heredabilidades observadas son mayores porque la varianza ambiental es menor. Lo anterior, implica que las heredabilidades se aplican a un conjunto específico de condiciones ambientales y experimentales (White et al, 2007).

Cuadro V-2. Heredabilidad y coeficiente de variación en características de crecimiento de *Pinus patula* en dos sitios.

Sitio	Ojo de Agua (2300 m)		Tlatoxca (1993 m)	
	Altura	Diámetro	Altura	Diámetro
h²_i	0.30	0.28	0.16	0.10
h²_f	0.52	0.50	0.36	0.27
CV (%)	8.8	7.5	10.0	8.2

h²_i: heredabilidad individual, **h²_f**: heredabilidad de familias, **CV**: coeficiente de variación.

Para las especies forestales la heredabilidad de las características de crecimiento generalmente es baja (en promedio 0.3) (Cornelius, 1994). Los valores de heredabilidad individual que se encontraron en este trabajo son menores a los que reportó Yang *et al.* (2013) para familias de 2 años de edad de *Pinus taeda* L., sin embargo, en dicho trabajo el tamaño y número de bloques fue menor, para minimizar el error ambiental debido a bloques, con lo que aumenta el valor de la heredabilidad.

La heredabilidad de familias fue mayor que la heredabilidad individual. La heredabilidad de familia depende del número promedio de individuos por familia, a mayor tamaño promedio de familias, mayor **h²_f** (White *et al.*, 2007), tal y como sucedió en el presente trabajo, ya que Ojo de Agua, además de presentar condiciones ambientales más uniformes, también presentó mayor supervivencia y por tanto valores más altos de heredabilidad de familias. En el caso de Tlatoxca la **h²_f** fue moderada en las dos características. En Ojo de Agua la **h²_f** fue alta para la altura y moderada para el diámetro. Generalmente, en edad temprana, el diámetro presenta menor heredabilidad que la altura (Yang *et al.*, 2013; Sánchez *et al.*, 2014) tal como sucedió en el presente trabajo.

Correlaciones genéticas y fenotípicas

Las correlaciones genéticas en los dos sitios fueron bajas (Cuadro V-3). Las correlaciones fenotípicas también fueron bajas a excepción de altura-diámetro, lo que indica que si se selecciona con base en altura también se tendrá una respuesta correlacionada elevada en el diámetro. Si fuera el caso, el uso de la altura como criterio de selección sería más apropiado ya que es una variable más fácil de medir que el diámetro en edad temprana.

En Tlatoxca las correlaciones fenotípicas fueron de mayor magnitud que en Ojo de Agua. Existe también alta correlación entre el número de verticilos con la altura y el diámetro, es decir, los individuos más altos y/o de mayor diámetro presentan también un mayor número de verticilos. De continuar esta tendencia en edad adulta, al hacer la selección de los mejores individuos a partir del crecimiento en altura, estaría disminuyendo la calidad de la madera ya que ésta tendría un mayor número de ramas, y, por tanto, de nudos.

Cuadro V-3. Correlaciones genéticas (bajo la diagonal) y fenotípicas (sobre la diagonal) de las características de crecimiento en Ojo de Agua (izquierda) y Tlatoxca (derecha).

	Altura	Diámetro	NV ^z		Altura	Diámetro	NV ^z
Altura		0.67	0.31	Altura		0.73	0.62
Diámetro	0.23		0.36	Diámetro	0.23		0.64
NV ⁿ	0.43	0.13		NV ⁿ	0.16	0.13	

^zNV: número de verticilos.

Salazar y colaboradores (1999) encontraron en un ensayo de especies y procedencias en el que se incluyó a *P. patula* de dos y medio años de edad que el número de verticilos promedio fue de alrededor de 6. Sin embargo, los árboles eran también de mayor altura (en promedio 1.8 m), poco más del doble de lo que se encontró en este trabajo.

Interacción genotipo-ambiente

El valor de la correlación genética tipo B fue moderado (Cuadro V-4) para altura y número de verticilos y nula en el caso del diámetro. Shelbourn (1977) menciona que un valor de 0.67 indica aceptable estabilidad. La altura fue la única característica medianamente estable. Morales (2012) encontró también para *P. patula* de 4 años de edad, mayor estabilidad para altura y número de verticilos en comparación del diámetro.

Cuadro V-4. Componentes de varianza y correlación genética tipo B para familias de *Pinus patula*.

Característica	Altura	Diámetro	NV ^z
$\sigma^2_f{}^y$	10.49	0.00	0.01
$\sigma^2_{sf}{}^x$	8.42	0.63	0.02
$r_B{}^w$	0.55	0.0	0.41

^zNV: número de verticilos, ^y σ^2_f = varianza de familias, ^x σ^2_{sf} = varianza de la interacción sitio*familia, ^w r_B = correlación genética.

Es común que los genotipos muestren inestabilidad en etapas tempranas del desarrollo, sin embargo, es esperado que con la edad muestren mayor estabilidad (Gómez, 2013). Tal como sucedió en un ensayo de progenies de *P. patula* establecido en Aquixtla,

Puebla, Méx., en donde se evaluó, a los 4 y a los 5 años, un ensayo de progenies establecido en Aquixtla, Puebla, Méx., en el que los valores de r_B fluctuaron de 0.52 a 0.67 para diámetro y de 0.76 a 1 para altura, en las mediciones (Morales-González, 2009).

Estabilidad de las familias

Los valores de ecovalencia fueron desde 0 a 6 % en el caso de la variable altura (Figura 5.1); y el 10 % de las familias contribuyó con 30.9 % de la variación. En esta variable fue evidente que las familias de mayor crecimiento mostraron mayor inestabilidad (familia 21, 56, 57, 48, 5 y 46).

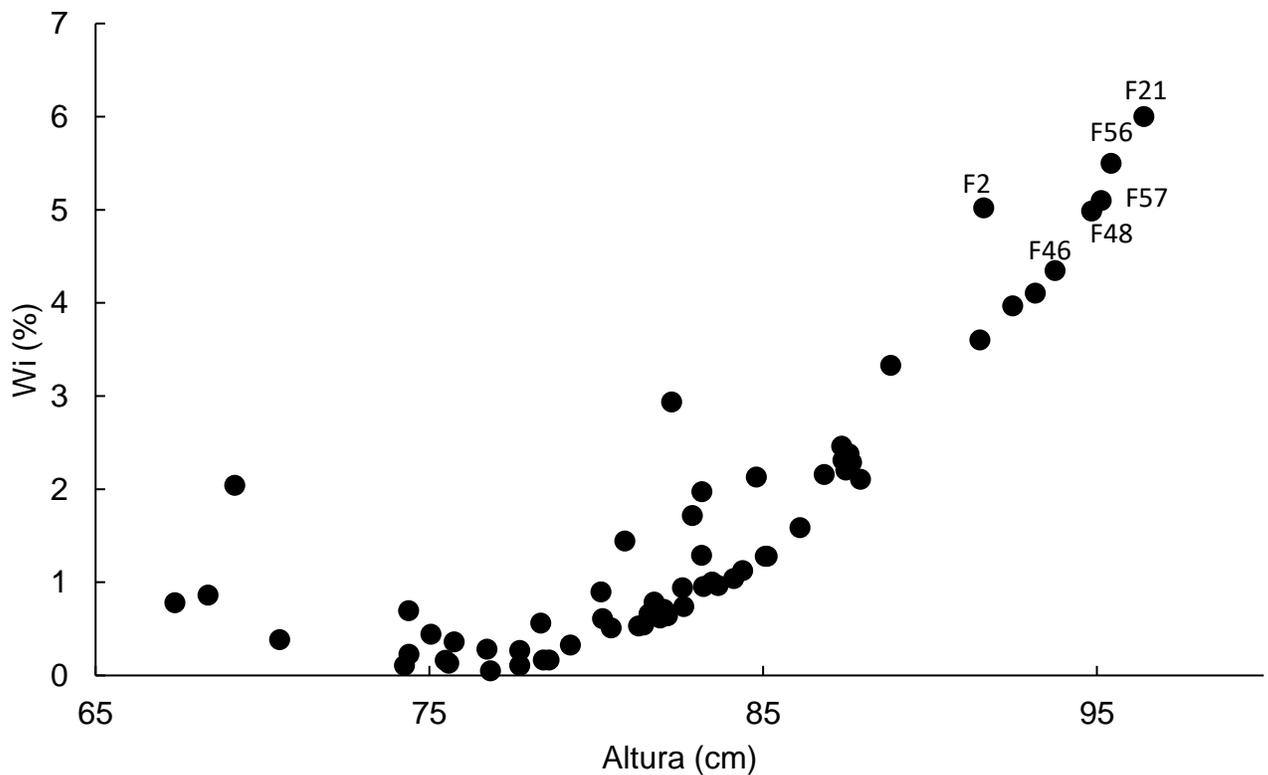


Figura 5-1. Relación entre el crecimiento promedio en altura (cm) y la contribución relativa a la varianza de la IGA en un ensayo de progenie de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación.

En la variable diámetro los valores de W_i variaron de 0 a 4.7 % (Figura 5.2), y las seis familias más interactivas contribuyeron con el 24.1 % del total de la variación. Las familias que se encuentran a la derecha (en la parte inferior, cercanas a $W_i=0$) mostraron mayor crecimiento y al mismo tiempo alta estabilidad, como es el caso de la familia 27, 21, 2 y 52 para esta variable.

Impacto de la exclusión de familias más interactivas

Al excluir del análisis a las seis familias más inestables (10 %) con base en los valores de ecovalencia (W_i) el valor de r_B aumenta, en el caso de la altura de 0.55 a 0.81, que es un valor más aceptable. En el caso del diámetro el valor de r_B cambia de 0 a 0.52, aunque sigue estando por debajo de un valor aceptable (0.67) aumenta de forma evidente (Figura 5-3).

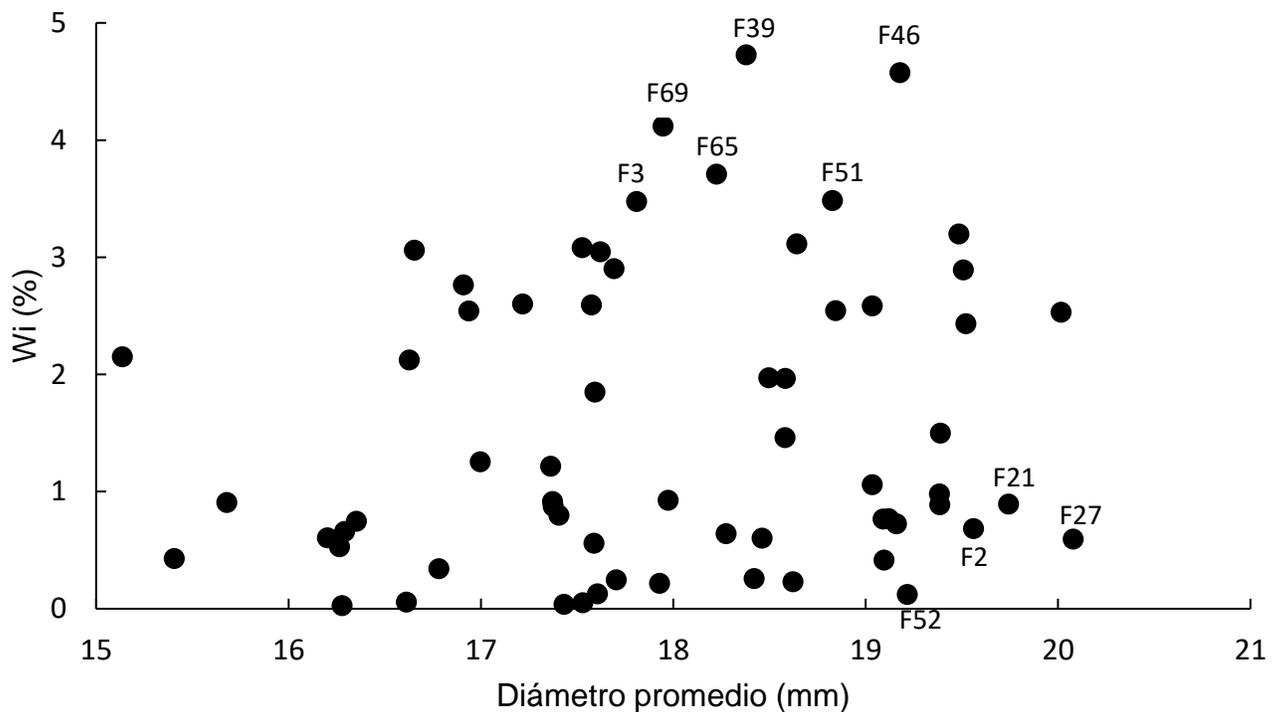


Figura 5-2. Relación entre el crecimiento promedio en diámetro (mm) y la contribución relativa a la varianza de la IGA en un ensayo de progenie de *Pinus patula* en dos sitios de evaluación.

Relación del crecimiento de las familias con la altitud del sitio de origen

En Ojo de Agua se encontró correlación significativa ($p=0.02$) entre el diámetro y la altitud de origen de los árboles madre (Figura 5.4), para la variable altura no se encontró relación significativa ($p=0.86$).

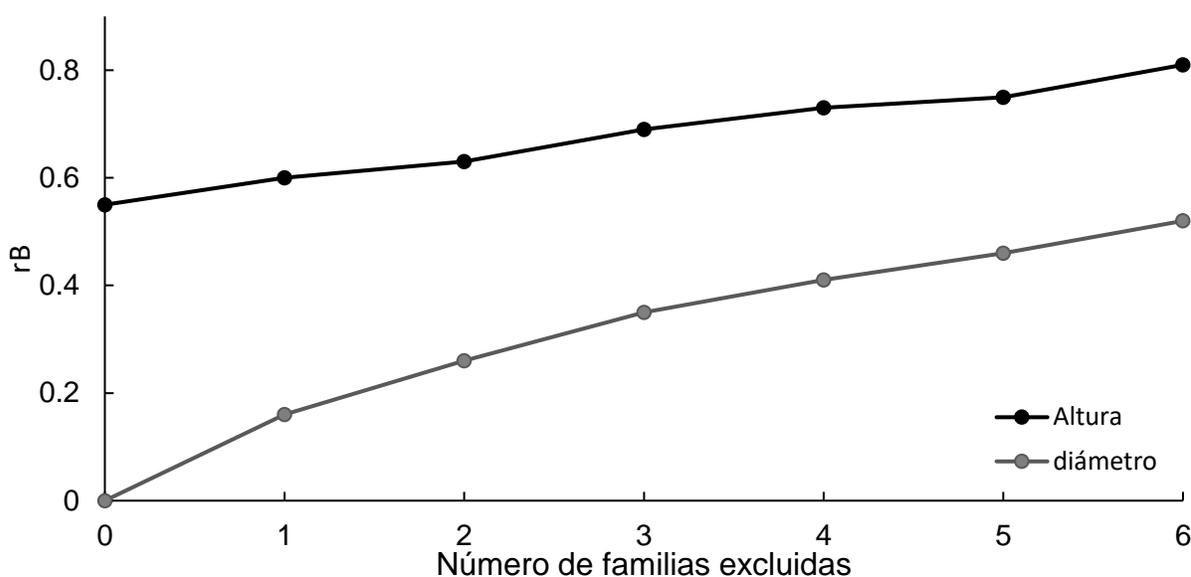


Figura 5-3. Cambio en el valor de la correlación r_B al eliminar el 10 % de las familias más interactivas para la altura y diámetro en un ensayo de progenies de *Pinus patula*.

Morales (2012) relacionó el volumen de familias de *P. patula* de 4 años de edad con la altitud de origen del árbol madre, pero no encontró asociación significativa. Las familias incluidas en dicho trabajo presentan distribución continua, lo que favorece el flujo de genes entre ellas. Sin embargo, en el presente trabajo, las familias se agrupan en tres regiones (Zacualtipán-Huayacocotla, Chignahuapan-Zacatlán y Teziutlán) (Cuadro V-1),

las cuales son discontinuas entre ellas, lo que podría estar favoreciendo la diferenciación de las familias.

En el caso de Tlatoxca no se encontró relación significativa para altura ($p=0.15$) y diámetro ($p=0.81$) con la elevación. En este sitio, la mayor variación ambiental entre y dentro de bloques pudo haber aumentado las diferencias entre familias, originando menor diferenciación entre ellas.

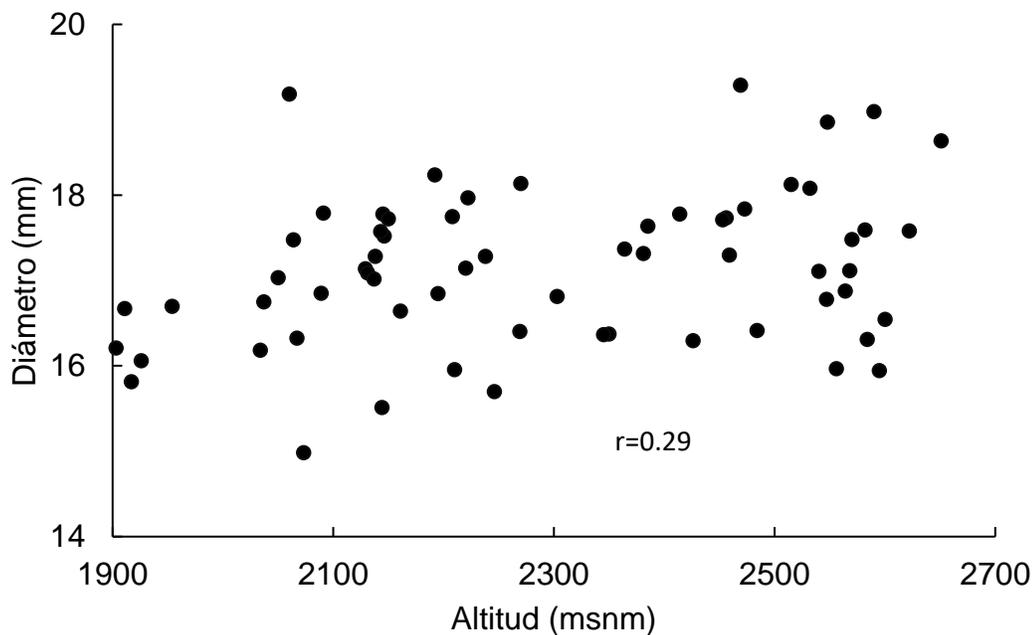


Figura 5-4. Relación del crecimiento en diámetro (mm) con la altitud de origen de la progenie de 64 familias de *Pinus patula* en Ojo de Agua, Huayacocotla, Ver.

5.6. Conclusiones

La heredabilidad individual fue baja para el diámetro y altura. La heredabilidad de familias fue mayor que la heredabilidad individual. El control genético tanto de altura como diámetro fue mayor en Ojo de Agua que en Tlatoxca. Las correlaciones genéticas entre las variables de crecimiento fueron bajas en los dos sitios. Las correlaciones fenotípicas

fueron de mayor valor en Tlatoxca. En Ojo de Agua, las familias que provienen de árboles madre ubicadas en sitios de mayor elevación mostraron mayor crecimiento en diámetro.

5.7. Recomendaciones

Se sugiere evaluar las familias a mayor edad ya que al presentarse el cierre de copas los valores pueden cambiar.

5.8. Literatura citada

- Adams T. W., S. N. Aitken, D. G. Joyce, G. T. Howe and J. Vargas-Hernández (2001) Evaluating efficacy of early testing for stem growth in coastal douglas fir. *Silvae Genetica* 50: 167-175.
- Codesido V. and J. Fernández L. (2009) Implication of genotype x site interaction on *Pinus radiata* breeding in Galicia. *New Forests* 37: 17-34.
- Falconer D. S. and T. F. Mackay (1996) Introduction to quantitative genetics. 4th. ed. Longman, UK. 464 p.
- Flores C., J. López U. y S. Valencia M. (2014) Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. Comisión Nacional Forestal. Jalisco, México. 152 p.
- Greenwood M. S. (1977) The role of dormancy in the development of male and female strobili of loblolly pine. *Forest Science* 19: 263-265
- Gómez M. P. (2013) Parámetros genéticos e interacción genotipo x ambiente en el crecimiento de progenies reintroducidas y nativas de *P. patula*. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Méx. 65 p.

- Morales G. E. (2012) Parámetros genéticos e interacción genotipo x ambiente en características de crecimiento en un ensayo de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. Tesis Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Méx. 72 p.
- Namkoong G. (1996) Inbreeding effects on estimation of genetic additive variance. *Forest Science* 12: 8-13.
- Pagliarini K. M., W. S. Kieras, J. P. Moreira, V. A. Sousa, J. Y. Shimizu, M. L. T. Morales, E. Furlani Jr. and A. V. Aguiar (2016) Adaptability, stability, productivity and genetic parameters in slash pine second generation families in early age. *Silvae Genetica* 65: 71-82.
- Salazar G. J., J. Vargas H., J. Jasso M., J. Molina G., C. Ramírez H. y J. López U. (1999) Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. *Madera y Bosques* 5 (2): 19-34.
- Sánchez V. N., V. Cambrón S., C. Sáenz R., J. J. Vargas H. (2014) Parámetros genéticos del crecimiento temprano de familias de medios hermanos de *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Revista Forestal Venezolana*: 65-76.
- Shelbourne C. J. A. (1972) Genotype-environment interaction: its study and its implications in forest tree improvement. *In*: Proceedings of the IUFRO Genetics-SABRAO Joint Symposium. IUFRO-SABRAO (Eds.). Tokyo, Japan. pp:1-28.
- Squillace A. E. (1974) Average genetic correlations among offspring from open-pollinated forest trees. *Silvae Genetica* 23: 149-156.

Statistical Analysis System (SAS Institute) (2002) SAS Version 9. N. C. USA.

Velázquez M. A., G. Ángeles P., T. Llanderal O., A. Román J. y V. Reyes H. (2004)
Monografía de *Pinus patula*. SEMARNAT/CONAFOR. Colegio de Postgraduados.
Zapopan, Jal. 425 p.

White T L, T W Adams, D B Neale (2007) Forest Genetics. CAB Int., Oxford. 682 p.

Wricke, G., 1962. Über eine methode zur erfassung der ökologischen streubreite in
feldversuchen. *Zeitschrift für Pflanzenzüchtung* 47:92-96.

Yamada Y. (1962) Genotype by environment interaction and genetic correlation of the
same trait under different environments. *Japan Journal of Genetics* 37: 498-509.

Yang H., T. Liu, C. Liu, J. Wang, K. Chen, W. Zhong, B. Chen and S. Huang. (2013)
Genetic parameters and efficiency of early selection for half rotation-aged growth
and form traits in *Pinus taeda* in China. *Silvae Genetica* 62: 277-284.

Ye T. S. and K. J. Syayawickrama (2012) Early Selection for Improving Volume Growth
in Coastal Douglas-fir Breeding Programs. *Silvae genetica* 61: 186-198.

Zobel B. J. y J. Talbert (1988) Técnicas de mejoramiento de árboles forestales. Limusa,
México D. F. 545 p.

CAPÍTULO VI.

Conclusiones y recomendaciones generales

Las poblaciones difieren en las características de semillas y crecimiento en vivero. Las semillas de mayor peso generaron plantas más grandes a los 6 meses. En campo, las poblaciones también difirieron en altura, diámetro y fenología del brote terminal pero no en supervivencia. En Tlatoxca las plantas fueron más altas, de mayor diámetro, activaron el brote con anticipación y mostraron mayor avance fenológico en el desarrollo del brote terminal.

Se encontró un patrón de variación definido en el que las semillas de sitios de menor altitud retrasaron su emergencia en relación a aquellas de mayor altitud. En campo, las plantas que provienen de sitios más fríos y secos presentaron menor altura en comparación con las poblaciones de sitios más cálidos y húmedos. A nivel de familia, las plantas que provienen de árboles madre ubicadas en sitios de mayor elevación mostraron mayor crecimiento en diámetro a los 15 meses de establecerse en campo. Estos resultados son útiles para planear la producción de planta en vivero y para ser considerados al establecer lineamientos para el movimiento de semilla o plántulas fuera de su sitio de origen.

La heredabilidad individual fue baja para diámetro y altura. La heredabilidad de familias fue mayor que la heredabilidad individual. El control genético tanto de altura como diámetro fue mayor en Ojo de Agua que en Tlatoxca. Las correlaciones genéticas entre las variables de crecimiento fueron bajas en los dos sitios.

Se recomienda evaluar en edades posteriores para identificar si los patrones de variación son consistentes y generar más información que permita definir lineamientos para el movimiento de germoplasma en esta región de estudio; y además identificar caracteres que se relacionen con las variables evaluadas en el presente trabajo, con la finalidad de poder disminuir el costo o tiempo de mejora.