

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**FERTILIZACIÓN DE UN ENSAYO
DE PROGENIES DE *Pinus patula*
Schiede ex Schltdl. et Cham. EN
CHIGNAHUAPAN, PUEBLA**

IVÁN JHESU VELÁZQUEZ CASTRO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2020

La presente tesis titulada: **Fertilización de un ensayo de progenies de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. en Chignahuapan, Puebla**, realizada por el alumno: **Iván Jhesu Velázquez Castro** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO

DR. ARNULFO ALDRETE

ASESOR

DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR

DR. JORGE DIONISIO ETCHEVERS BARRA

ASESOR

DR. JAVIER LÓPEZ UPTON

**FERTILIZACIÓN DE UN ENSAYO DE PROGENIES DE *PINUS PATULA* SCHIEDE EX
SCHLTDL. ET CHAM. EN CHIGNAHUAPAN, PUEBLA**

Iván Jhesu Velázquez Castro, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2020

RESUMEN

Pinus patula es una especie que puede ser utilizada extensivamente en plantaciones forestales en México para satisfacer la demanda interna de productos maderables. Para aumentar la capacidad productiva de la especie se deben considerar el mejoramiento genético y el manejo nutricional. El primero ya ha tenido avances relevantes, mientras que del segundo se tiene menos experiencias en México. En este sentido, se propuso evaluar el efecto de la fertilización en un ensayo de progenies con 100 familias de polinización libre en Chignahuapan, Puebla. Cuatro tratamientos de fertilización fueron propuestos: 1) un tratamiento control; 2) uno denominado “técnico”, basado en análisis foliares; 3) otro, aplicando un fertilizante de liberación controlada, basado en otras experiencias de fertilización; y 4) uno compuesto por una mezcla de fertilizantes agrícolas que asemejaran las concentraciones nutrimentales del fertilizante de liberación controlada. El objetivo fue evaluar la respuesta que pueden generar estos tratamientos en altura, diámetro, índice de biomasa, número de verticilos, masa foliar y fenología de la yema apical, aplicados a dos grupos genotípicos diferentes (superiores e inferiores). Los resultados a un año mostraron una ligera respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes de liberación controlada en los genotipos superiores, para el crecimiento absoluto, y en los inferiores, para la producción relativa, además de diferencias derivadas por la calidad genética pero no para ningún tratamiento de fertilización en particular.

Palabras clave: fertilizante de liberación controlada, grupos genotípicos, interacción genotipo x fertilizante, nutrición forestal, ocote colorado.

**FERTILIZATION OF A PROGENY TEST OF *PINUS PATULA* SCHIEDE EX SCHLTDL.
ET CHAM. IN CHIGNAHUAPAN, PUEBLA**

Iván Jhesu Velázquez Castro, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2020

ABSTRACT

Pinus patula is a species that can be used extensively in forest plantations in Mexico to satisfy the internal demand for timber products. To increase the productive capacity of this species, genetic improvement and nutritional management should be considered. The first has already made significant progress, while the second has less experience in Mexico. Therefore, the evaluation of the effect of fertilization in a progeny trial with 100 free-pollinated families in Chignahuapan, Puebla, was proposed. Four fertilization treatments were tested: 1) a control treatment without fertilization; 2) one called “technical”, based on the control of nutritional status through foliar analysis; 3) another, using a controlled-release fertilizer, based on other fertilization experiences; and 4) one made up of a mixture of agricultural fertilizers that resemble the nutritional concentrations of the controlled-release fertilizer. The objective was to assess the response that these treatments can generate in two different genotypic groups (higher and lower) in: height, diameter, biomass index, number of whorls, leaf mass and apical bud phenology. The one-year results showed a slight positive response to the application of controlled-release fertilizers in the higher genotypes, for absolute growth, and in the lower ones, for relative production, in addition to differences derived from genetic quality but not for any particular fertilization treatment.

Key words: controlled-release fertilizer, forest nutrition, genotypic groups, genotype x fertilizer interaction, weeping pine.

DEDICATORIA

A mis padres

María Guillermina Castro Popoca y Sergio Everardo Velázquez Vicentín

A mis hermanos

Eric Alejandro Velázquez Castro y Gilberto David Velázquez Castro

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento y las facilidades otorgadas para la realización de mi programa de maestría en ciencias.

Al Colegio de Postgraduados (CP) por proporcionarme los recursos para mi formación como maestro en ciencias.

A los Drs. Arnulfo Aldrete, Miguel Ángel López López, Jorge Dionisio Etchevers Barra y Javier López Upton, por haber participado como miembros de mi Consejo Particular, por su amistad, paciencia, disposición, asesoría y consejo para concluir mis estudios de maestría.

A las autoridades del Ejido Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla, por las facilidades brindadas para la utilización del área experimental y el desarrollo de la presente investigación.

A los académicos del Colegio de Postgraduados, por su amistad y las enseñanzas recibidas a lo largo de mi formación.

Al todo el personal administrativo del Postgrado en Ciencias Forestales, por su apoyo y consejo en la realización de los trámites requeridos durante toda esta etapa académica.

A Zaira R. Pérez V., por todo su cariño, por siempre apoyarme en todo lo posible y por los momentos y las experiencias compartidas.

A todos los compañeros y amigos (Gardenia, José, Joel, Marce, Dana, Reynol, Erickson, Jesús) que hicieron posible la realización del presente experimento y por los buenos momentos. De manera particular a Vicente García F. y Frida Moreno D., por su amistad y disposición para realizar las salidas de campo y la toma de datos, así como el apoyo y ánimos para continuar y concluir esta investigación.

A todos... por todo... ¡muchísimas gracias!

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
LISTA DE CUADROS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.2. Hipótesis.....	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. Taxonomía y descripción botánica de <i>Pinus patula</i>	4
2.2. Importancia de <i>Pinus patula</i> en México y en el mundo.....	8
2.3. Consideraciones básicas de Nutrición Vegetal.....	8
2.3.1. Funciones de los nutrimentos en las plantas.....	9
2.3.2. Absorción de nutrimentos por las plantas	9
2.3.3. Métodos de detección de deficiencias nutrimentales.....	11
2.4. Fertilización para el aumento de la productividad de especies forestales.....	16
2.4.1. Tipos de fertilizantes y su uso en el sector forestal.....	17
2.4.2. Experiencias de fertilización en coníferas y en el género <i>Pinus</i>	19
2.5. Mejoramiento Genético Forestal y avances en <i>P. patula</i>	26
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
3.1. Área de estudio.....	31
3.2. Ensayo de progenies	31
3.3. Establecimiento del experimento y tratamientos aplicados.....	33
3.4. Medición de las variables morfológicas y fenología.....	38
3.5. Recolecta y pesado de muestras foliares.....	39
3.6. Diseño experimental y análisis estadístico.....	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
4.1. Resultados.....	41
4.2. Discusión.....	48

5. CONCLUSIONES.....	59
6. LITERATURA CITADA	60
ANEXOS.....	81

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Cantidades de fertilizante adicionado en el tratamiento de comparación con el fertilizante de liberación controlada en g árbol⁻¹ y mL árbol⁻¹, según el caso	35
Cuadro 2. Comparación de las cantidades adicionadas por nutrimento, en g totales, en cada tratamiento	36
Cuadro 3. Significancia estadística de los efectos evaluados derivados del análisis de varianza para la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa relativa de producción (TRP) de la altura total (ALT), diámetro al cuello de la raíz (DCR), índice de biomasa (IB) y diámetro a la altura de pecho (DAP), número de verticilos (VERT), la masa de 100 acículas (MASA_100) y el inicio (YEMA_IN) y cese del crecimiento (YEMA_F)	41
Cuadro 4. Medias de las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y las tasas relativas de producción (TRP) de la altura total (ALT), el diámetro al cuello de la raíz (DCR), el índice de biomasa (IB) y el diámetro a la altura de pecho (DAP) por tratamiento, grupo genético y su combinación.....	42
Cuadro 5. Medias de las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y las tasas relativas de producción (TRP) del diámetro a la altura de pecho (DAP), el número de verticilos (VERT), la masa de 100 acículas (MASA_100), el inicio (YEMA_IN) y cese de crecimiento (YEMA_F) por tratamiento, grupo genético y su combinación.....	43

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Detalle de la morfología de *Pinus patula*. A) Árbol adulto, B) corteza de tres árboles diferentes, C) ramillas y acículas, D) conos femeninos..... 5
- Figura 2.** Diagrama que muestra la relación de la composición mineral del tejido con el rendimiento..... 14
- Figura 3.** Localización del ensayo de progenies de *Pinus patula* en el ejido de Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla..... 32
- Figura 4.** Detalle del ensayo de progenies de *Pinus patula* y espaciamiento entre árboles 32
- Figura 5.** Disposición de los 20 bloques del ensayo en campo y Disposición ejemplo de las 100 familias en cada bloque del ensayo de progenies de *Pinus patula*..... 33
- Figura 6.** Obtención de las muestras de suelo para su análisis de laboratorio 34
- Figura 7.** Obtención de las muestras de tejido foliar de árboles de *Pinus patula* para su análisis de laboratorio..... 35
- Figura 8.** Bloques seleccionados para el establecimiento del experimento y aleatorización de los tratamientos de fertilización propuestos. 36
- Figura 9.** A) detalle de la apertura del suelo y forma de aplicación del fertilizante de liberación controlada (Tratamiento 3), B) preparación de solución fertilizante (Tratamientos 2 y 4) y C) dos de las aperturas en el suelo en los puntos cardinales del árbol..... 36
- Figura 10.** A) medición completa de un árbol individual, B) detalle de la medición del diámetro al cuello de la raíz con cinta diamétrica, C) detalle de la medición de altura con estadal..... 38
- Figura 11.** Comparación de medias obtenidas de la tasa relativa de producción (TRP) en índice de biomasa (IB), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico. 44
- Figura 12.** Comparación de medias obtenidas de la tasa de crecimiento absoluto (TCA) en índice de biomasa (IB), entre el tratamiento control (Trat 1),

el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.....	44
Figura 13. Comparación de medias de la tasa relativa de producción (TRP) en altura total (ALT), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.....	45
Figura 14. Comparación de medias obtenidas de la tasa relativa de producción (TRP) en diámetro al cuello de la raíz (DCR), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.....	46
Figura 15. Comparación de las medias obtenidas para la tasa de crecimiento absoluto (TCA) del diámetro a la altura de pecho (DAP), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.....	47
Figura 16. Comparación de medias obtenidas del día juliano de inicio de crecimiento (YEMA_IN), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.....	47

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. CONCENTRACIONES FOLIARES BASE PARA DISEÑAR LOS TRATAMIENTOS DE FERTILIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL BASADO EN LAS CONCENTRACIONES CRÍTICAS OBTENIDAS POR SÁNCHEZ <i>ET AL.</i> (2018).....	81
Anexo B. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL SITIO EXPERIMENTAL DE PUEBLO NUEVO, CHIGNAHUAPAN, PUEBLA	82
Anexo C. DATOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS DEL ENSAYO DE PROGENIES Y EL ÁREA DE RECOLECTA DE LAS FAMILIAS DE <i>PINUS PATULA</i> SELECCIONADAS; DATOS OBTENIDOS DE VIRGINIA TECH Y USDA FOREST SERVICE (2020) TOMANDO EN CONSIDERACIÓN A GARCÍA Y SIERRA (2016).....	84

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de productos forestales a nivel mundial, ha ido incrementándose año con año (Morland *et al.*, 2018). La producción de madera en México varió entre 1997 y 2017 de 5.5 a 9.0 millones de m³r, con una relación producción/consumo que ha disminuido de 58% a 33% (SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca), 1998; SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003, 2008, 2013, 2020a). En 1997 se implementó el Programa para el Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales (PRODEPLAN) el cuál buscaba aumentar la superficie plantada y satisfacer la demanda interna de productos forestales (CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2012). Hasta 2018 se tenía reporte de la existencia de alrededor de 350,000 ha plantadas, tanto de especies maderables como no maderables en todo el país (SEMARNAT, 2020b).

Las plantaciones forestales son una forma de satisfacer las necesidades de madera, al reducir la presión a los bosques naturales, promover un uso más eficiente de la tierra y obtener mayor producción. Su importancia es tal que a nivel mundial representan actualmente alrededor del 7% del total de área forestal y, en el año de 2012, proveían alrededor de 46.3% del total de la producción de madera en rollo (Paquette y Messier, 2010; Payn *et al.*, 2015).

La alta productividad de las plantaciones está relacionada con la producción de plantas de calidad en vivero, la preparación y mantenimiento de los sitios de plantación, el control de la densidad, el manejo de la calidad del suelo, el mejoramiento genético y la biotecnología. Si se implementan estas prácticas es posible obtener rendimientos hasta 3.0-3.5 mayores que los conseguidos en los bosques naturales (Fox, 2000; Fox *et al.*, 2006, 2007b; Munsell y Fox, 2010).

El género *Pinus* es el más utilizado para el establecimiento de plantaciones a nivel mundial y una de las especies más utilizada es *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal *et* Chamisso, la cual ha sido introducida a varios países, la mayoría, en el hemisferio sur (Wright, 1994; Dvorak, 2002). A pesar de las numerosas investigaciones que resaltan sus ventajas y potencial productivo (Wormald, 1975; Dvorak *et al.*, 1995, 2000), esta conífera ha sido poco usada en México al grado que, en 2010, sólo había 4,230 ha plantadas en todo el país (Sáenz-Romero *et al.*, 2011).

Para poder aumentar la productividad de *P. patula* en México se pueden mejorar dos aspectos: el componente genético, a través de la utilización de genotipos superiores, y el manejo silvícola, al incluir la fertilización.

El mejoramiento genético de *P. patula* ha avanzado desde 1994, y se ha centrado en la búsqueda de individuos más productivos (Sáenz-Romero *et al.*, 1994; Salaya *et al.*, 2012; Morales *et al.*, 2013) y con mayor calidad de madera (Valencia y Vargas, 2001; Bustillos *et al.*, 2018; Escobar *et al.*, 2018).

El uso de fertilizantes tradicionales en campo ha demostrado ser efectivo para la especie en algunos países africanos (Carlson, 2000; Morris, 2003; Maliondo *et al.*, 2005; Titshall *et al.*, 2013; Mavimbela *et al.*, 2018) y también en México (Lázaro *et al.*, 2012; López y Estañol, 2014; Vásquez *et al.*, 2015), en su mayoría, con efectos positivos en el crecimiento. No obstante, a pesar de esto, su eficiencia, al ser aplicados al suelo varía entre 5 y 25% (Salgado y Núñez, 2012; Binkley y Fisher, 2013) por lo que, una alternativa viable para evitar variación, es el uso de fertilizantes de liberación controlada.

Los fertilizantes de liberación controlada están compuestos por una sal base y una cobertura que permite la liberación lenta de la sal base por hidrólisis, degradación o difusión, en un período que va de 3 hasta 18 meses. Algunas de las ventajas de estos fertilizantes son: menos pérdidas por lixiviación y escorrentía; disponibilidad de los nutrientes al inicio del crecimiento de las raíces; menor tiempo y energía para su absorción, entre otros (Ali y Danafar, 2015; Chandra *et al.*, 2019).

Aunque los fertilizantes de liberación controlada se utilizan mayoritariamente en la producción de planta en vivero, también se ha reportado su aplicación en campo, demostrándose que pueden ser igual o más efectivos que los fertilizantes tradicionales (Jacobs *et al.*, 2003; Rose *et al.*, 2004; Haase *et al.*, 2006; Landis y Dumroese, 2009) y, aunque son más costosos, se estima que se requieren en menor cantidad para obtener los mismos beneficios (Reyes-Millalón *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2018; González *et al.*, 2018).

Para evaluar las diferencias entre estos tipos de fertilizantes se consideraron cuatro tratamientos de fertilización: 1) un tratamiento control; 2) uno denominado “técnico”, basado en análisis foliares; 3) otro, aplicando un fertilizante de liberación controlada, basado en otras experiencias de fertilización; y 4) uno compuesto por una mezcla de fertilizantes agrícolas tradicionales que asemejaran las concentraciones nutrimentales del fertilizante de liberación controlada. Este experimento fue establecido en un ensayo de progenies de *Pinus patula* de 3 años en el ejido de Peñuelas Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla, con el objeto de analizar el efecto del fertilizante en el crecimiento y la fenología de 20 familias de árboles, divididas en dos grupos, superiores e inferiores por su crecimiento a los 3 años de edad, según su desempeño genotípico.

1.1. Objetivos

Objetivo general:

- Evaluar el efecto de la fertilización en el crecimiento de 20 familias de *Pinus patula* var. *patula*, divididas en dos grupos genotípicos: superiores e inferiores.

Objetivos particulares:

- Comparar la respuesta generada en el incremento en la altura total, el diámetro al cuello de la raíz, el índice de biomasa, el diámetro a la altura del pecho y número de verticilos, entre los individuos de *P. patula* sometidos a tres diferentes tratamientos de fertilización con respecto a un tratamiento control sin fertilización, después de un año de aplicados.
- Evaluar el posible cambio en la fenología de los individuos, a partir de la modificación en las fechas de inicio y cese de crecimiento, debido al efecto de la fertilización.
- Determinar la efectividad biológica del uso de materiales fertilizantes de liberación controlada en contraste con fertilizantes de uso agrícola.
- Identificar diferencias entre grupos genotípicos como respuesta a la fertilización.

1.2. Hipótesis

El crecimiento esperado de *P. patula* con base en técnicas de diagnóstico nutrimental (análisis foliar) y la basada en experiencias previas de fertilización, redundan en tasas de crecimiento similares en los árboles.

A concentraciones nutrimentales similares, los fertilizantes de liberación controlada y los fertilizantes agrícolas tradicionales promueven una respuesta similar en el crecimiento de los árboles.

La fenología de los individuos de *P. patula* es igual entre todos los tratamientos de fertilización y el tratamiento control sin fertilizar.

Los dos grupos genotípicos de árboles responden igual al mejoramiento de la condición nutrimental del suelo por medio de la fertilización química.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Taxonomía y descripción botánica de *Pinus patula*

Pinus patula Schiede ex Schlechtendal *et*. Chamisso es un pino endémico de México comúnmente conocido como ocote, ocote colorado, ocote liso, ocote macho, ocote rojo, pino colorado, pino chino, pino de México, pino xalacote y pino triste (Monroy, 1995), mientras que a nivel internacional se le denomina como “Jelecote pine”, “Spreading-leaved pine” o “Mexican weeping pine” (Monroy, 1995; Farjon, 2010). Etimológicamente, el epíteto del nombre científico significa “extendiéndose ampliamente” en referencia a las hojas del árbol, que tienen una disposición caída y colgante (Farjon, 2010).

Taxonómicamente la especie se clasifica de la siguiente manera [USDA (US Department of Agriculture) y NRCS (Natural Resources Conservation Service), 2020]:

Reino: *Plantae* – Plantas

Subreino: *Tracheobionta* – Plantas vasculares

Superdivisión: *Spermatophyta* – Plantas con semilla

División: *Coniferophyta* – Coníferas

Clase: *Pinopsida*

Orden: *Pinales*

Familia: *Pinaceae* – Familia de los pinos

Género: *Pinus* L. – Pinos

Especie: *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendal *et* Chamisso

Según Perry (1991), esta especie pertenece al Subgénero *Diploxylon*, Sección *Serotinae*, Subsección *Patula*, aunque Farjon (1996) sugiere que pertenece al Subgénero *Pinus*, Sección *Pinaster*, Subsección *Oocarpae*.

En México existen dos variedades de esta especie, *P. patula* y *P. longipendunculata* Loock ex Martínez, la primera distribuida desde la Sierra Madre Oriental desde Tamaulipas hasta la Sierra de Pápalos en Oaxaca (entre los 18° y los 24° de Latitud N); la segunda puede encontrarse en las sierras de los estados de Oaxaca y muy escaso en Chiapas (entre los 16° y los 17° N) (Perry, 1991; Dvorak, 2002). La variedad *patula* se distribuye de manera natural en los estados de Tamaulipas, Nuevo León, Querétaro, Hidalgo, Puebla, Veracruz, Tlaxcala y Oaxaca (Velázquez *et al.*, 2004).

En general el árbol presenta un fuste recto, sin ramas desde la mitad y hasta dos tercios de su copa total, que llega a tener hasta 20 m de fuste limpio. Las ramas crecen en verticilos, con una disposición horizontal, creando una pequeña copa abierta y redondeada. Sus dimensiones varían de 30 a 35 (40) m de altura con diámetros a la altura de pecho de entre 50 y 90 (100) cm, (Perry, 1991; Velázquez *et al.*, 2004) (Figura 1A). Presenta una raíz principal pivotante con presencia de grupos de raíces secundarias, de grosor similar, que emergen del eje central y pueden penetrar en el suelo hasta 2 m de profundidad (Monroy, 1995).

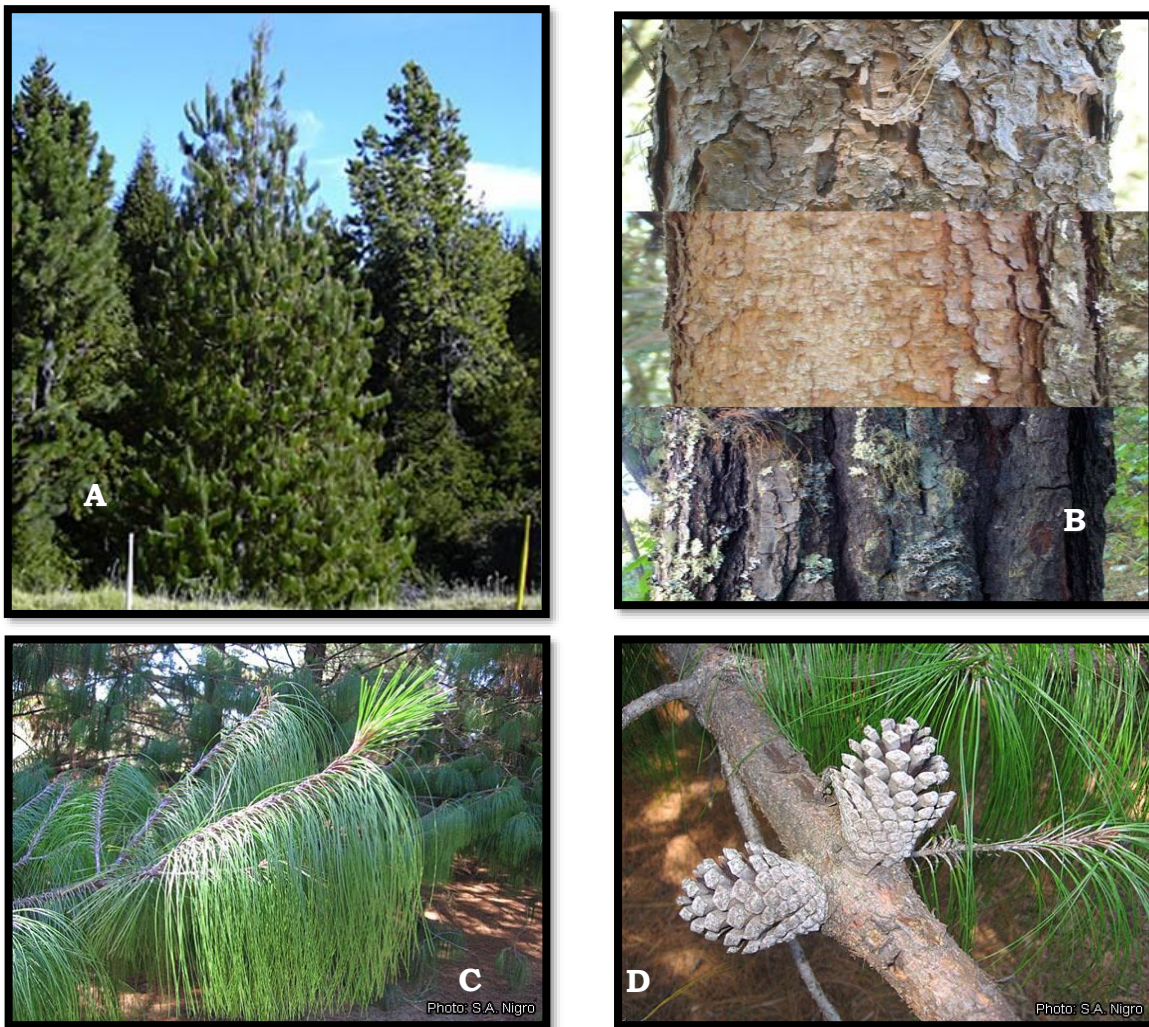


Figura 1. Detalle de la morfología de *Pinus patula*. A) Árbol adulto, B) corteza de árbol en tres árboles diferentes, C) ramillas y acículas, D) conos femeninos. (Nigro, 2008; Earle, 2020).

La corteza en árboles jóvenes es delgada, de textura escamosa y coloración rojiza. En individuos maduros es gruesa, agrietada y de tonalidad oscura, aunque en bajas alturas (3-4 m), conserva las características juveniles (Perry, 1991) (Figura 1B).

Las yemas suelen ser multinodales, de textura áspera y escamosa y color amarillo a café rojizo (Farjon, 2010). Vela (1980) menciona que éstas son binodales y forman dos entrenudos durante el año. En árboles que presentan crecimiento uninodal se pueden observar distancias entre nudos de hasta 3 m, mientras que los árboles con crecimiento multinodal (entre 6 y 8 flujos de crecimiento en árboles jóvenes; un flujo de crecimiento en viejos) la distancia puede disminuir hasta 0.4 m entre cada nudo; éstos pueden crecer de manera simultánea tanto en árboles jóvenes como adultos (Wormald, 1975).

Las ramillas son delgadas y usualmente están caídas, presentan acículas con vida útil de 2 a 4 años, dispuestas en fascículos persistentes de tres, en ocasiones cuatro y rara vez cinco acículas, de entre 15 a 25 cm, anfiestomáticas, con uno a cuatro canales resiníferos (comúnmente, tres), márgenes finamente aserrados y color verde pálido a verde amarillento (Wormald, 1975; Perry, 1991; Velázquez *et al.*, 2004) (Figura 1C).

Los conos masculinos tienen un pedúnculo corto, son ovoides-oblongos a cilíndricos, de 1 a 2 cm de longitud, color amarillo rosáceo (Farjon, 2010); se originan tanto en las ramas como en el tronco en grupos densos de dos, tres, cuatro y hasta 10 o más (Perry, 1991). La floración ocurre de fines de febrero a principios de marzo y llega a su madurez a mitad del mes (Vela, 1980).

Los conos femeninos son fuertes, persistentes y seróticos, cafés lustrosos o café amarillentos, cónicos y ligeramente curvados, de unos 7 a 10 cm de longitud (Velázquez *et al.*, 2004). Presentan apófisis casi plana a ligeramente alzada, con margen agudo u obtuso-redondeado. El umbo es dorsal, plano o alzado, usualmente hundido en la apófisis (Farjon, 2010) (Figura 1D).

El proceso de polinización y maduración de las semillas dura de 18 a 24 o 48 meses, aunque no todas maduran al mismo tiempo (Vela, 1980; Velázquez *et al.*, 2004). Cuando están maduras las semillas son de color café oscuro, casi negras, muy pequeñas, con cinco cotiledones o, rara vez, cuatro (Velázquez *et al.*, 2004). En un kilogramo puede haber alrededor de 115 mil semillas (Perry, 1991).

La albura de este pino es blanco amarillenta pálida y el duramen es ligeramente más oscuro. Tiene una densidad moderada (0.44 a 0.60 kg cm⁻³) (Dvorak, 2002) y se estima que la edad de transición de madera juvenil a madura es de alrededor de 10 años (Meza *et al.*, 2005).

Ecológicamente es una especie que posee su nicho en los bosques mesófilos de montaña de las sierras montañosas del país, esto debido a la ocurrencia de nubes y neblina que mantienen la humedad. Crece en áreas con suelos de buena profundidad (> 60 cm), viéndose desplazada por otras especies en aquellos más someros (Dvorak *et al.*, 2000). Puede presentarse en masas puras o asociándose con otras especies arbóreas como *Pinus teocote* Schiede ex. Schltdl. *et* Cham., *P. ayacahuite* Ehrenb. ex Schltdl., *P. douglasiana* Martínez, *P. leiophylla* Schiede ex. Schltdl. *et* Cham., *P. maximinoi* H. E. Moore, *P. pseudostrobus* Lindl., *Quercus* spp., *Liquidambar styraciflua* L., *Cupressus benthamii* Endl., *Juniperus* spp., *Abies religiosa* (Kunth) Schltdl. *et* Cham. y rara vez con *P. greggii* Engelm. ex Parl. y *Taxus* sp. (Perry, 1991; Dvorak, 2002; Velázquez *et al.*, 2004; Farjon, 2010).

Altitudinalmente *P. patula* puede distribuirse desde los 1,600 a los 3,000 m sobre el nivel del mar (Vela, 1980), aunque algunos autores proponen un rango ligeramente más amplio de los 1,400 a los 3,200 m (Perry, 1991; Gillespie, 1992; Velázquez *et al.*, 2004), encontrándose más comúnmente entre los 2,100 a los 2,800 m (Dvorak, 2002).

La exposición no suele limitar su presencia dentro de su distribución natural, no obstante en algunas zonas se encuentra en las exposiciones este, noreste y sureste debido al efecto que tienen los vientos húmedos que entran desde el Golfo de México (Vela, 1980; Velázquez *et al.*, 2004).

Con respecto a la temperatura, Vela (1980) y Gillespie (1992) mencionaron que los rangos de temperatura media anual en su área de distribución varían de 10 a 18°C mientras que las temperaturas del mes más frío y el más caliente, usualmente diciembre y mayo, fluctúan entre 6.0 a 12.4°C y 12.7 a 29.0°C, respectivamente. Excluyendo los casos extremos, la oscilación térmica del área de distribución es de alrededor de 20°C.

Puede desarrollarse en los tipos climáticos correspondientes a C(fm) templado húmedo, C(w₂) templado subhúmedo, C(m) templado húmedo con precipitación del mes más seco menor a 40 mm y C(w₂'') templado subhúmedo con un período seco corto en verano, según la clasificación de Köppen modificada por García (2004); los dos primeros son los preferidos por la especie (Vela, 1980).

La especie suele prosperar mejor en suelos profundos con pH ácido, alta relación C:N, alto contenido de calcio, potasio y bajo en fósforo, abundante materia orgánica, pobres en arcillas, con buena humedad e infiltración y elevada capacidad de intercambio catiónico (Vela, 1980).

2.2. Importancia de *Pinus patula* en México y en el mundo

P. patula es de gran importancia en el sector forestal tanto en su distribución natural como en plantaciones alrededor del mundo, esto debido a que es una de las especies de mayor productividad, lo que ha impulsado el interés de evaluar su capacidad productiva con la finalidad de maximizar su beneficio económico (Vela, 1980; Styles, 1993).

En su área de distribución, *P. patula* es sumamente apreciado por su rápido crecimiento, buena madera, bajo contenido de resina y características físico-mecánicas adecuadas. Usualmente se utiliza para la producción de celulósicos y madera para aserrío, y es particularmente recomendada para la construcción de estructuras que requieren madera con alta resistencia mecánica (Monroy, 1995; Velázquez *et al.*, 2004). Wright (1994) indicó que la madera se utiliza en la construcción ligera, carpintería, entarimados, como combustible y también con fines ornamentales. Debido a esto, la especie ha sido parte de numerosos estudios con el objeto promover su mejora genética desde los años 70's (Wormald, 1975).

La introducción de la especie a varios países, particularmente en el Hemisferio Sur, ha promovido el establecimiento de plantaciones forestales con fines de protección, restauración, control de la erosión, captura de carbono, cercos vivos, sombra para café y producción de hongos comestibles (*Boletus edulis* Bull.), esto sin dejar de lado la producción de madera y sus derivados como postes y pilotes, tableros de partículas, carbón, cajas de cerillos, construcción, chapa y triplay, pulpa para papel y cajas e interiores (Patiño y Kageyama, 1991; Wright, 1994; Dvorak *et al.*, 1995; Velázquez *et al.*, 2004). Para 1991, se estimaban alrededor de 1 millón de hectáreas plantadas de *P. patula* en el mundo, siendo Sudáfrica el país con la mayor superficie plantada (alrededor del 30%) (Wright, 1994; Dvorak, 2002).

A pesar de todo lo anterior, la especie ha sido poco usada en México al grado que, en 2010, sólo había sido utilizada para el establecimiento de 4,230 ha en todo el país (Sáenz-Romero *et al.*, 2011).

2.3. Consideraciones básicas de Nutrición Vegetal

Un nutrimento vegetal es un elemento químico esencial para que una planta crezca y se reproduzca (Barker y Pilbeam, 2007). Para designar a un elemento como esencial se deben cumplir los siguientes criterios: 1) una planta no puede desarrollarse normalmente o completar su ciclo de

vida cuando el elemento está ausente, 2) el elemento no puede sustituirse o reemplazarse por otro, y sólo al ser suministrado se corregirá la deficiencia, 3) se deben conocer sus funciones o su participación en el metabolismo de las plantas y, 4) el elemento debe afectar directamente a la condición nutrimental de la planta, y debe originarse por la modificación del sustrato (Arnon y Stout, 1939; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

A la fecha, existen 17 elementos que cumplen con los criterios anteriores y son requeridos por las plantas superiores (C, H, O, N, P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo, Ni y Cl) (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Los tres primeros son obtenidos a partir del aire y el agua, mientras que los 14 restantes son suministrados por el medio de crecimiento (suelo, sustrato o solución nutritiva) en el cual se encuentre la planta (Barker y Pilbeam, 2007).

2.3.1. Funciones de los nutrimentos en las plantas

Los 17 nutrimentos esenciales pueden ser clasificados de diferentes maneras. Una de ellas es con base en la cantidad que es requerida por las plantas, de esta forma, los elementos C, H, O, N, P, S, K, Ca y Mg son designados macronutrientes, mientras que el Fe, Mn, Cu, Zn, Mo, B, Cl y Ni corresponderían a los micronutrientes (Mengel *et al.*, 2001). Una segunda clasificación se basa en la forma química en la cual son absorbidos, ya sea como anión, catión o molécula sin disociar (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

Una tercera clasificación considera su naturaleza química y sus funciones fisiológicas, la cual es la más adecuada y completa. Las funciones se pueden ordenar en tres grupos: 1) estructurales, en donde el nutrimento forma parte de la molécula de uno o más compuestos orgánicos, 2) constituyente de enzimas, ya sea como parte de su grupo prostético o promoviendo la activación de la enzima (cofactor) y, 3) participación en el transporte, regulación osmótica y demás procesos fisiológicos, mediante la formación de enlaces de baja energía con moléculas orgánicas de bajo peso molecular que facilitan su movimiento dentro de la planta (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

2.3.2. Absorción de nutrimentos por las plantas

Los nutrimentos se encuentran de manera natural en el suelo en tres formas. Sin embargo, la forma absorbible por las plantas es como iones o moléculas pequeñas disueltas en la solución del suelo (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Su absorción involucra una serie de pasos que incluyen: 1) el movimiento de los iones del suelo a las raíces (intercepción, difusión o flujo en masas), 2) su

acumulación en las raíces, 3) su transporte hacia el xilema y 4) su translocación a las yemas y demás meristemos (Kozlowski y Pallardy, 1997).

Al entrar el agua en la raíz, principalmente a través de los pelos radicales, puede seguir dos rutas para llegar al xilema: la apoplástica y la simplástica. La primera permite el flujo o difusión irrestricto de agua y iones por los espacios libres entre las células radicales hasta la banda de Caspary, obligándolos a seguir la ruta simplástica para llegar a las células del xilema. La segunda también transporta agua y iones, pero se vale del movimiento a través de las membranas celulares y sus uniones (plasmodesmos) con ayuda de proteínas que facilitan la entrada de agua (acuaporinas) y iones, ya sea de forma pasiva (difusión, canales proteicos o acarreadores) o de forma activa (portadores o canales) (Taiz y Zeiger, 2010; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

La savia bruta (agua y iones) dentro de las células del xilema es transportada de forma unidireccional desde las raíces hasta los tejidos de mayor tasa transpirativa [no necesariamente a los de mayor demanda nutrimental (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013)], de acuerdo a la teoría de cohesión-tensión (Kozlowski y Pallardy, 1997; Meinzer *et al.*, 2001). En las hojas, la savia es utilizada en la fotosíntesis para la formación de carbohidratos los cuales son redistribuidos, junto con otras moléculas (aminoácidos, proteínas, fitohormonas y iones inorgánicos), a través del floema a los diferentes sitios de demanda de la planta, según el modelo de flujo de presión [gimnospermas a menor velocidad que angiospermas (Liesche y Schulz, 2018)] (Taiz y Zeiger, 2010; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

Es probable que el movimiento de los carbohidratos se encuentre regulado para buscar el balance entre la cantidad generada en los tejidos productores o responsables de la adquisición de un recurso limitante (raíces, hojas, cotiledones, hipocótilos, yemas, ramillas, tallos, flores, frutos y estróbilos) y la cantidad requerida para mantener las funciones de la planta en los tejidos demandantes o sumideros (Kozlowski, 1992; Landsberg y Sands, 2011; Gessler y Grossiord, 2019).

Las especies de crecimiento libre o recurrente en altura suelen asignar una mayor cantidad de carbohidratos a las yemas para mantener su rápida y constante elongación durante todo el año. La genética juega un papel importante al regular la fecha de inicio del crecimiento, su tasa de crecimiento y duración estacional, siendo características intrínsecas de cada individuo en particular (Kozlowski *et al.*, 1991; Kozlowski, 1992; Kozlowski y Pallardy, 1997). Dickson (1989) señaló

que, en este tipo de especies, el transporte entre las partes superiores e inferiores podría ser cíclico, en un inicio, enfocado al desarrollo del tejido foliar y, después del crecimiento completo de las hojas, canalizándose al tronco inferior y las raíces.

Cuando un árbol se encuentra estresado en alguna forma, la priorización del uso de carbohidratos puede modificarse como lo mencionan Waring y Pitman (1985). Estos últimos propusieron una jerarquía en el patrón de translocación del carbono en un árbol considerando el orden siguiente: 1) yemas y tejido foliar, 2) nuevas raíces, 3) tejidos de reserva (troncos y raíces), 4) crecimiento en diámetro y 5) producción de químicos de defensa. Aunque Minchin y Lacoine (2005) reportan que el modelo de priorización del uso de carbohidratos más aceptado, presumiblemente tanto para gimnospermas como angiospermas (Desalme *et al.*, 2017), tiene el orden: 1) semillas, 2) partes carnosas de los frutos = ápices de yemas y hojas, 3) cambium, 4) raíces y 5) almacenamiento.

2.3.3. Métodos de detección de deficiencias nutrimentales

El crecimiento de los árboles depende de la eficiencia fotosintética, la respiración y la distribución a los componentes de biomasa que, a su vez, están en función de la genética de los individuos, así como de clima y el suelo, los cuales regulan la disponibilidad de agua y nutrimentos (Fox *et al.*, 2007a).

Por lo anterior, es de considerarse que, al subsanar el factor limitante del crecimiento (luz, agua o uno o más nutrimentos), el rendimiento debe verse afectado positivamente, además de que, al alterarse cualquier otro elemento sin enmendar la deficiencia, no se generará cambio alguno en el crecimiento (ejemplo, adición de nutrimentos en sitios con sequía). En contraste, la modificación simultánea de dos o más factores del crecimiento podría promover un efecto conjunto, posiblemente mayor a cada uno de sus efectos individuales (Mengel *et al.*, 2001; Binkley y Fisher, 2013).

Una deficiencia nutrimental es el resultado de la carencia de un elemento esencial en la planta y se expresa a través de síntomas característicos producto de un metabolismo alterado (Taiz y Zeiger, 2010). Para su identificación es posible valerse de 1) el diagnóstico visual, comparando una muestra vegetal afectada y una muestra patrón sana (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013) o 2) el diagnóstico químico, el cual involucra un conjunto de herramientas analíticas químicas que sirven

para evaluar el estado nutricional de una planta utilizando suelo, solución de suelo, tejidos vegetales o agua de riego (Etchevers, 1999).

Las posibles expresiones observables pueden corresponder a cinco tipos: 1) clorosis, 2) necrosis, 3) inhibición del crecimiento de las yemas terminales o “arrosamiento”, 4) acumulación de antocianina (enrojecimiento) y 5) reducción del crecimiento con posible presencia de coloraciones anormales (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

En especies forestales, el diagnóstico visual se limita a deficiencias severas de un sólo nutrimento y, además, la sintomatología es altamente dependiente de la especie. En el caso de las plantaciones, las deficiencias suelen depender del estado de crecimiento de los árboles (sucede principalmente en etapas jóvenes, por un escaso reciclaje de nutrientes) y por interacciones entre el sitio, el suelo y la especie plantada (Alvarado, 2016).

Así también, en especies arbóreas, el uso de raíces, corteza interna, frutos, entre otros, ha sido considerado para realizar el diagnóstico químico nutrimental, sin embargo, las hojas han sido el órgano más utilizado (Alvarado, 2016).

El análisis foliar tiene los siguientes objetivos: 1) valorar sí el estado nutrimental de la planta es adecuado, 2) corroborar el diagnóstico visual, 3) apoyar en la determinación del “hambre oculta”, 4) evaluar la respuesta a la fertilización, 5) definir interacciones o antagonismos nutrimentales, entre otros (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Los resultados de laboratorio suelen expresarse en términos de concentración (en porcentaje o mg g^{-1} de peso seco o fresco) o contenido (kg o mg de peso seco o fresco hoja⁻¹) de un nutrimento particular (Marschner, 2012).

Debido a que la información obtenida sirve para intentar mantener las concentraciones nutrimentales requeridas para maximizar el rendimiento, para determinar el potencial de los rodales para responder a la fertilización y como base para proponer una formulación fertilizante (Etchevers, 1999; Brockley, 2001), resulta imperioso contar con procedimientos de muestreo que permitan obtener la mejor y más representativa información de la condición nutrimental de una planta (Alvarado, 2016).

Factores como la estación del año, la variación climática anual, la hora de muestreo, la edad del árbol, del rodal y su variabilidad genética, el diámetro a la altura de pecho, la pendiente, la exposición, la competencia, la condición nutrimental y la salud del árbol influyen las fluctuaciones

de la concentración nutrimental, no obstante, los factores de mayor influencia son: la estación de muestreo, la edad del follaje y su flujo de crecimiento, la posición de la copa y el manejo de las muestras (Wells, 1969; van den Driessche, 1974; Brockley, 2001; Alvarado, 2016).

Wells y Allen (1985), Ballard y Carter (1986) y Brockley (2001) propusieron observar las siguientes consideraciones al momento de realizar el muestreo de tejido foliar en coníferas: la recolecta debe realizarse en la época de dormancia (invierno) y corresponder al primer flujo de crecimiento del año presente, ya sea del cuarto superior o la mitad inferior de la copa viva y que esté libre de competencia por luz. Además, se debe limitar a árboles dominantes o codominantes, sin abundante producción de conos, plagas y enfermedades, o con cercanía a caminos no pavimentados.

Los datos de laboratorio permiten relacionar el estado nutrimental de la planta con su capacidad productiva máxima. Varios métodos se han desarrollado para definir esta relación y uno de los que han sido utilizados en el ámbito forestal es el método de la Concentración Crítica (Needham *et al.*, 1990; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013; Alvarado, 2016).

La Concentración Crítica es un concepto basado en la revisión de Macy (1936), el cual se puede definir como: 1) la concentración nutrimental que, por insuficiencia, limita el máximo crecimiento, 2) aquella concentración que es suficiente para mantener el máximo rendimiento y es apenas adecuada para que la planta alcance el máximo crecimiento y 3) aquella que separa la condición de deficiencia y suficiencia de un nutrimento en la planta, *i. e.*, la que separa la zona de deficiencia y la zona de suficiencia. Aunque éstas definiciones hacen referencia a una concentración puntual, se considera que en realidad debe ser un rango estrecho de concentraciones que marcan el límite entre el suministro adecuado y la presencia de deficiencias (Ulrich, 1952). Ulrich y Hills (1967) lo redefinieron como la concentración nutrimental crucial que implica la obtención del 90% del rendimiento máximo. Hoy en día se acepta que la concentración crítica es la que permite alcanzar entre el 90 y el 95% del rendimiento máximo posible (Reuter y Robinson, 1997).

En el campo forestal se toman en consideración dos niveles críticos. El primero divide la condición óptima y la deficiencia leve (“hambre oculta”), el rendimiento se mantiene a un 90% y no hay signos visibles de deficiencia (concentración crítica) mientras que el segundo es aquel en el que la deficiencia se torna severa y se expresa visualmente (nivel crítico de síntomas) (Figura

2) (Richards y Bevege, 1972; Esse *et al.*, 2014; Alvarado, 2016). Adicionalmente se reporta un nivel crítico de toxicidad que está relacionado con una disminución del 5 al 20% del rendimiento relativo de la planta (Reuter y Robinson, 1997) (Figura 2).

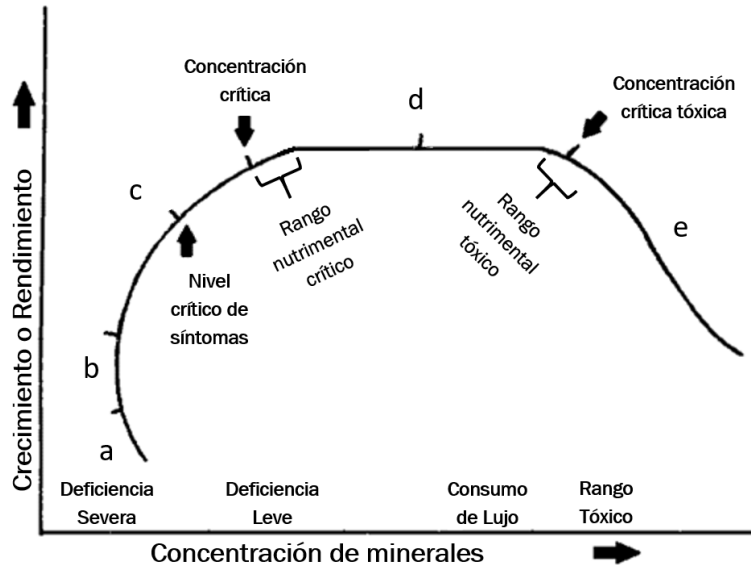


Figura 2. Diagrama que muestra la relación de la composición mineral del tejido con el rendimiento. Adaptado de (Smith, 1962; Dow y Roberts, 1982; Reuter y Robinson, 1997; Alvarado, 2016).

La demostración gráfica de la relación entre la condición nutrimental y el rendimiento puede representarse mediante una curva con cinco zonas bien delimitadas (Figura 2), en las cuáles puede darse un efecto conocido como Steenbjerg o Piper-Steenbjerg (*a*) (Steenbjerg, 1951; Wikström, 1994; Esse *et al.*, 2014), o efecto de dilución, una zona de estabilidad en la concentración con un incremento en la producción; (*b*), una zona de incremento no lineal entre el rendimiento y la concentración; (*c*) en donde se eliminan los síntomas visuales y se logra llegar a la concentración crítica o rango crítico (Smith, 1962; Dow y Roberts, 1982; Esse *et al.*, 2014; Alvarado, 2016), una zona de suministro adecuado que puede resultar en un consumo de lujo (*d*) y, de continuar con la aplicación del nutrimento, llegar a la zona de toxicidad (*e*) (Smith, 1962; Esse *et al.*, 2014).

En el caso de algunos pinos se han reportado concentraciones foliares entre 0.80-1.55% de N, 0.09-0.15% de P, 0.25-0.55% de K, 0.06-0.10% de Ca, 0.04-0.10% de Mg y 0.16% de S, que pueden indicar un suministro adecuado del nutrimento en el individuo. Valores para algunos micronutrientes también han sido reportados pero no han sido bien establecidos, sin embargo, concentraciones de 25, 50, 15, 3, 12 y 0.1 ppm de Mn, Fe, Zn, Cu, B y Mo, respectivamente, se reportan como aceptables (Ballard y Carter, 1986; Alvarado *et al.*, 2006; Binkley y Fisher, 2013).

Sánchez *et al.* (2018) realizaron un estudio para estimar normas DRIS y concentraciones críticas en *P. patula*, utilizando muestras foliares de 50 árboles con diámetro a la altura de pecho entre 15 y 17 cm, ubicados en cuatro municipios de Puebla (Ahuazotepec, Aquixtla, Chignahuapan y Zacatlán) y uno de Veracruz (Huayacocotla). El resultado fue la obtención de una primera aproximación al establecimiento de estándares nutricionales que puedan ser utilizados para recomendaciones de fertilización en esta especie (Anexo 1).

Los análisis de suelo son otra forma de obtener información para realizar un diagnóstico y tener información complementaria de estado nutrimental de las plantas. Se clasifican en dos grupos: 1) aquellos asociados, indirectamente, con la fertilidad del suelo y 2) los que corresponden a indicadores de disponibilidad nutrimental, y se utilizan para conocer la probable disponibilidad de un nutrimento particular (no necesariamente la cantidad que existe de él en el suelo) que permita proponer recomendaciones de fertilización (Etchevers, 1999; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

El pH, la conductividad eléctrica, el porcentaje de materia orgánica, el N Kjeldahl, entre otros, son algunas determinaciones del primer grupo y los resultados obtenidos pueden ser interpretados mediante el uso de tablas de amplia validez. Estos resultados se relacionan con la fertilidad del suelo, pero no dan información específica acerca de la disponibilidad de un nutrimento (Etchevers, 1999).

Las determinaciones del segundo grupo requieren del empleo de soluciones químicas, resinas y a veces de óxidos específicos para determinar la disponibilidad de los nutrimentos en sus diferentes fracciones. Se clasifican en: a) solubles (N-nítrico, P y B, cuando la extracción se hace con agua o CaCl₂ 0.01M), b) intercambiables (Ca, K, Mg y Na, normalmente en acetato de amonio, pero es posible usar otras soluciones), c) extraíbles (P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu y Mo, con soluciones ácidas, básicas, salinas o acomplejantes), d) fijadas y e) mineralizables. Los resultados ofrecen una idea general de la fertilidad química de un suelo (Etchevers, 1999; Alcántar y Trejo-Téllez, 2013).

A pesar de que el diagnóstico de la fertilidad del suelo tiene poca aplicabilidad en las especies forestales, debido a su fisiología (Alvarado, 2016), el aumentar el conocimiento sobre las propiedades del tipo de suelo o material parental puede tener gran repercusión en la posibilidad de obtener respuestas favorables, derivadas de prescripciones de fertilización ajustadas a las condiciones particulares de cada área de plantación (Titshall *et al.*, 2013; Jokela y Long, 2018).

2.4. Fertilización para el aumento de la productividad de especies forestales

La fertilización es una práctica que ha sido utilizada en la agricultura desde poco más de un siglo y tiene por objetivos: 1) fungir como fuente adicional de nutrimentos, para subsanar los requerimientos de los cultivos de alto rendimiento, 2) restituir los nutrimentos extraídos por cosecha o perdidos por lixiviación y 3) promover la resistencia a factores bióticos y abióticos (Salgado y Núñez, 2012). En especies forestales, la fertilización tiene la finalidad de producir una mayor cantidad de madera, ya sea en volumen o en peso, procurando minimizar el deterioro de su calidad y, en casos particulares, promover la producción de semillas (Williams *et al.*, 2003; Smethurst, 2010).

Está considerado que casi todos los bosques en el mundo se encuentran limitados en su crecimiento por uno o más nutrimentos, siendo el N y el P los más frecuentes y, en menor medida, el K, el Mg, el Fe, el Zn, el Cu, el Mo y el B (Gonçalves *et al.*, 1997; Miller, 2004; LeBauer y Treseder, 2008; Binkley y Fisher, 2013). De manera general y a nivel global se ha observado que, en diversos ecosistemas terrestres, la adición de N puede promover un incremento en la producción de alrededor del 29% (LeBauer y Treseder, 2008).

Con base en la utilidad que tiene la fertilización, se han determinado cuatro etapas en las que resulta más adecuada su aplicación. La primera es en establecimiento de una plantación y hasta los 3 meses; la segunda es al momento del cierre de copas, cuando empiezan a observarse deficiencias nutrimentales, dado que el suelo no puede aportar la cantidad necesaria de nutrimentos y, por ello, se observa una reducción en la productividad (Fox *et al.*, 2006); la tercera cuando se realizan aclareos, de forma que se genere una respuesta conjunta en el crecimiento; y, la cuarta, puede realizarse entre 3 y 10 años antes de la cosecha para incrementar el volumen final (Evans y Turnbull, 2004).

A pesar de todo, se debe considerar que la respuesta derivada de la fertilización dependerá de un gran rango de factores tales como la composición y estructura de la masa forestal, la cantidad, la forma y la época del año de aplicación, el nutrimento adicionado, la eficiencia de la especie para aprovechar el fertilizante y su genética, el efecto en el incremento de la capacidad de intercepción y uso de la radiación solar, la priorización del uso de los carbohidratos generados, entre otros (Sauerbeck y Helal, 1990; Binkley *et al.*, 1995; Amponsah *et al.*, 2004; Miller, 2004; Binkley y Fisher, 2013; Alvarado, 2016).

Asimismo, la respuesta a la fertilización resulta ser mayor en árboles de mayor tamaño, tanto en la tasa de crecimiento absoluto como relativo (Carlson *et al.*, 2008), y tiene mucha relación con el índice de sitio. Puede darse el caso que no genere respuesta alguna o, incluso, promueva decrementos en el crecimiento (Zhao *et al.*, 2016).

En promedio, se estima que el efecto resultante de la adición de N puede durar entre 5 y 10 años y la adición de P sigue generando respuesta después de 20 y hasta 50 años después de aplicado el fertilizante (Turner *et al.*, 2002; Fox *et al.*, 2007a; Trichet *et al.*, 2009; Alvarado, 2016).

Es importante recalcar que, a pesar de que la fertilización puede promover la productividad de los árboles, existen otros factores adicionales como el manejo de la competencia vegetal, la preparación y mantenimiento del sitio, el mejoramiento genético y la biotecnología que también pueden aumentar el rendimiento maderable (Fox *et al.*, 2007a). En la actualidad, prácticamente todos los países que cuentan con plantaciones forestales han implementado la fertilización como parte integral de su manejo silvícola (Smethurst, 2010).

2.4.1. Tipos de fertilizantes y su uso en el sector forestal

Un fertilizante puede definirse como cualquier material, natural o sintético, que contiene al menos 5% de cualquiera de los tres nutrimentos primarios (expresados en forma de N-P₂O₅-K₂O) y, por tanto, son sustancias que promueven la fertilidad del suelo o aportan estos recursos necesarios para el apropiado crecimiento y desarrollo de las plantas. Pueden tener muchas apariencias, según su proceso de fabricación, ya sea desde gránulos, ‘pellets’, ‘prills’, cristales o polvo fino o grueso/compactado, categorizándose en 1) sólidos, 2) ultrasolubles (usados en fertiirrigación o microaspersión), 3) líquidos y 4) gaseosos (amoníaco anhidro) (UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) y IFDC (International Fertilizer Development Center), 1998; FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) y IFA (International Fertilizer Industry Association), 2000; Salgado y Núñez, 2012).

Su aplicación puede ser directamente al suelo, al follaje, a través del agua de riego o insertado en el tronco, lo que se relaciona con su aprovechamiento por las plantas. Aplicado en el suelo, las pérdidas pueden representar el 50% o más del total del nutrimento adicionado. En los árboles, se estima que la recuperación de un fertilizante es de alrededor del 5% al 25%. El N puede perderse entre 10-20% por volatilización o lixiviación y 70% quedarse en el suelo; por su parte, el P tiene tasas de recuperación del 30%, quedando fijo o inmovilizado en los componentes del suelo y el K

tiene tasas variables, perdiéndose por lixiviación o quedando fijo a arcillas con un posterior aprovechamiento (Salgado y Núñez, 2012; Binkley y Fisher, 2013). Para mejorar su aplicación y reducir las pérdidas se promovió el desarrollo de nuevas tecnologías que culminaron en la creación de los fertilizantes de liberación controlada (Chandra *et al.*, 2019).

Los fertilizantes de liberación controlada corresponden a los fertilizantes más innovadores y de mayor desarrollo tecnológico que pueden proveer de nutrimentos a las plantas tanto en vivero como en campo. Son productos compuestos de una sal base y una cobertura o cápsula que liberan su contenido de forma variable ya sea por hidrólisis, degradación o difusión, de 3 y hasta 18 meses. La tasa de liberación de nutrimentos está regulada por la humedad del suelo, la temperatura y/o la actividad microbiológica, de forma que el agua entra en la envoltura del fertilizante y la rompe, el fertilizante se difunde a través de la membrana de la cubierta o ésta se degrada por procesos físicos, químicos o microbianos (Rose *et al.*, 2004; Salgado y Núñez, 2012; Ali y Danafar, 2015; Chandra *et al.*, 2019).

Lo ventajoso de estos materiales en comparación con los convencionales es que: 1) se evita “quemar” a la planta o las hojas por exceso de fertilizante, 2) se minimiza el daño a semillas y plántulas por exceso de sales, 3) tienen una mejor manipulación, distribución y almacenamiento, 4) pueden utilizarse en viveros (raíz desnuda o contenedor), invernaderos y en campo, 5) se disminuyen las pérdidas por lixiviación, altas temperaturas, luz o escorrentías y reduce la eutroficación de los cuerpos de agua, 6) menor posibilidad de generar toxicidades, 7) reducen el tiempo y energía para su absorción, 8) es fácil ajustar el tipo de fertilizante y la tasa de aplicación, 9) se tiene mayor eficiencia de uso, 10) mayor disponibilidad de los nutrimentos al inicio del crecimiento de las raíces, 11) se aplican menos frecuentemente, y 12) menos mano de obra (Rose *et al.*, 2004; Landis y Dumroese, 2009; Ali y Danafar, 2015; Naik *et al.*, 2017; Chandra *et al.*, 2019).

Sin embargo, es de notar que su costo es mucho más alto (1.93 a 5.62 veces más que la urea), no han sido utilizados ampliamente (sólo 0.15% del consumo total de fertilizantes a nivel mundial), se debe investigar más a fondo las interacciones que tiene cada tipo de fertilizante con los factores bióticos y abióticos donde será aplicado y, por cuestiones ambientales, puede que se liberen a una tasa menor que la esperada, permitiendo la aparición de deficiencias nutrimentales o la pérdida por

lixiviación, lo que también depende mucho de la marca de fertilizante utilizado (Rose *et al.*, 2004; Salgado y Núñez, 2012; Naik *et al.*, 2017).

Varias marcas de FLC han sido utilizadas en la producción forestal entre las que destacan el Osmocote®, Apex®, Multicote®, Diffusion®, Nutricote® y Polyon®. En viveros, el producto se mezcla con el medio de crecimiento al momento de realizar la siembra como fertilizante superficial durante la época de crecimiento; en plantaciones y viveros a raíz desnuda, se recomienda aplicarlo al momento de su establecimiento, ya sea colocándolo en la cepa, a un lado de la plántula o al voleo en su base, con la posibilidad de volver a fertilizar después de 1 o 2 años (Jacobs *et al.*, 2003; Rose *et al.*, 2004; Landis y Dumroese, 2009).

2.4.2. Experiencias de fertilización en coníferas y en el género *Pinus*

Existen varios ejemplos de fertilización en el mundo. Se tienen reportes de efectos positivos de la aplicación de N y P en coníferas de lento crecimiento en Europa (Binkley *et al.*, 1995; Trichet *et al.*, 2009; Smethurst, 2010; Binkley y Fisher, 2013), en el noroeste y suroeste de EE.UU. y el oeste de Canadá (Binkley *et al.*, 1995; Garrison-Johnston *et al.*, 2005; Lindgren *et al.*, 2007; Goodsman *et al.*, 2010; Pinno *et al.*, 2012; Binkley y Fisher, 2013) y así también, en coníferas de tasa intermedia de crecimiento en Australia, Nueva Zelanda y el S.E. de EE.UU. (Binkley *et al.*, 1995; Albaugh *et al.*, 2007; May *et al.*, 2009).

Una de las experiencias más destacadas es el caso de *Pinus taeda* L. y *Pinus elliottii* Engelm. en el S.E. de EE.UU., en dónde se suelen realizar dos fertilizaciones. La primera se da al establecimiento y se añade P a razón de 56 kg ha⁻¹ para obtener incrementos de entre 2.8 a 3.5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ hasta por 20 años; la segunda se realiza en rotaciones intermedias y se añaden 225 y 28 kg ha⁻¹ de N y P, respectivamente, para obtener entre 0.7 y 7.0 m³ ha⁻¹ año⁻¹ durante 8 a 10 años. Se ha observado también que existen sitios donde hay deficiencias de K, Ca, B, Cu y Mn las cuales, si se corrigen, pueden aumentar la producción de madera hasta 3.5 m³ ha⁻¹ año⁻¹ adicionales a la sola aplicación de N y P (Fox *et al.*, 2007a).

Los efectos generados por la fertilización pueden durar más de 25 años, promoviendo incrementos en volumen de entre 35% (fertilización, F), 90% (fertilización + deshierbe, F+W) y 120% (deshierbes, W) en *P. elliottii* y entre 60% (W), 80% (F) y 105% (FW) en *P. taeda*, además de que logran una mejor distribución de los productos maderables (Jokela *et al.*, 2010) y hasta pueden generar un impacto residual que se observa en las siguientes rotaciones, las cuales

aumentan aún más las diferencias entre el control y las demás prescripciones (Crous *et al.*, 2007a; Subedi *et al.*, 2019). Sin embargo, esto puede no suceder en todos los casos, como lo reportan Turner y Lambert (2013) con *Pinus radiata* D. Don en Australia.

Investigadores chilenos mencionan experiencias variables a la aplicación individual de nutrimentos para *P. radiata*, en general, entre 20–100 g de N, 50 g de K, 25 g de B y, especialmente, 50–200 g de P han probado ser eficientes para generar buenas respuestas en crecimiento (Binkley *et al.*, 1995; Rubilar *et al.*, 2008b).

Álvarez *et al.* (1999) encontraron que, la aplicación de 200 g de P₂O₅ o 20 g de N planta⁻¹ de forma anual por 2 años en una plantación de esa misma especie, de 2 años, resultó ser una buena opción para incrementar el índice de biomasa [IB = diámetro al cuello de la raíz² * altura total; 160% y 20% más que el control aplicando P y N, respectivamente] 1 y 2 años después de la fertilización.

Albaugh *et al.* (2004) encontraron, igualmente para *P. radiata* que el efecto de la remoción de malezas (en bandas, durante los 2 primeros años) y sus combinaciones con la preparación del suelo y la fertilización (27-32, 30-36 y 1.5-1.8 kg ha⁻¹ de N, P y B) generó respuestas estadísticamente significativas en el diámetro al cuello de la raíz (entre 43 y 155% más), diámetro a la altura de pecho (entre 29 y 406% más) y altura total (25 a 125% más que el control) en comparación con la preparación del suelo y la fertilización de manera individual (27-32, 30-36 y 1.5-1.8 kg ha⁻¹ de N, P y B), después de 3 años establecidas.

En un experimento similar, Rubilar *et al.* (2008a) demostraron que la fertilización (26, 16.7, 2.5 g árbol⁻¹ de N, P y B) generó diferencias estadísticamente significativas en el diámetro al cuello de la raíz, la altura total y el índice de biomasa desde los primeros 2 meses y hasta 6 meses de aplicada cuando se realizó en conjunto con la remoción de malezas, situación que ya no se presentó 31 meses después con respecto a los sitios en los que sólo se controlaron las malezas.

En etapas intermedias de la rotación (12-15 años y hasta 21 años), diferentes combinaciones de N, K y B pueden aumentar las concentraciones foliares de N y P entre en los primeros 3 años e incrementar el diámetro a la altura de pecho, el área basal y el volumen a diferentes tasas, según el tipo suelo en donde estén creciendo los árboles. Se encontró que los suelos arcillosos no generaron respuesta en ninguna variable de crecimiento, presumiblemente por una alta disponibilidad nutrimental (Ramírez-Alzate *et al.*, 2016).

En Sudáfrica la fertilización generalmente se aplica a nivel de planta individual (20 g de P en *Pinus caribaea* Morelet, *P. patula*, *P. elliottii* y *P. taeda* con un efecto hasta por 9 años). No obstante, en plantaciones de pino, se ha recomendado aplicar P (10–25 kg ha⁻¹), al momento del establecimiento y 5-90 kg ha⁻¹ después del primer aclareo (Binkley *et al.*, 1995; Alvarado, 2016).

Alvarado *et al.* (2006) publicaron resultados de experiencias de fertilización de *P. caribaea* var. *hondurensis* (Sénécl) W. H. Barrett *et Golfari* en Costa Rica, en donde se han probado dosis de 30 g árbol⁻¹ de 14-14-14, en plantaciones después del trasplante y 80 g árbol⁻¹ de 12-24-12 o 50 kg de superfosfato triple ha⁻¹, 2 meses después del trasplante, generando buenas respuestas en altura total y volumen. En el caso de Panamá, se reportan aplicaciones al establecimiento de 57 g árbol⁻¹ de 15-15-15, 28 g árbol⁻¹ de elementos menores y 14 g árbol⁻¹ de B con efectos importantes en la supervivencia y en el crecimiento.

En Pinar del Río, Cuba, para la misma especie, se encontró que 600 g árbol⁻¹ de 8-10-10, aplicados de forma alternada o continua en los primeros 5 años de plantación, generó los mayores incrementos en el diámetro a la altura de pecho con respecto al control, mientras que las dosis de 800 y 1,000 g árbol⁻¹ obtuvieron los mejores desempeños para la altura total y el volumen (Alvarado *et al.*, 2006; León *et al.*, 2016).

En *Pinus pinea* L. plantado en Valladolid, España, se obtuvieron diferencias significativas en la altura total, después de 1 y 2 años de establecida la plantación, utilizando 15 g de Agroblen® (12-24 meses, 9-13-18+3MgO+Fe) por planta, seguido por Agriform® (24 meses, 20-15-5) aplicando 21 g planta⁻¹ (Cañellas *et al.*, 1999).

Ibañez *et al.* (2004) mencionaron, que en Argentina con *P. taeda*, no es frecuente fertilizar al momento del establecimiento de la plantación, no obstante, experimentaron que la fertilización con 120 g planta⁻¹ de superfosfato triple (0-46-0) y el subsolado a 50 u 80 cm promovían el crecimiento del diámetro al cuello de la raíz, la altura total y el factor de productividad [$F_p = (DCR^2 * HT / 100)$] 1 y 2 años después de la fertilización.

Trazzi *et al.* (2019) encontraron que la aplicación de 12 a 18 g árbol⁻¹ de 0-23-14 + Mg, S, B generó respuestas significativas en el diámetro al cuello de la raíz y la altura total a los 6 y 12 meses, cuando el fertilizante fue aplicado al momento del establecimiento de un huerto semillero de *P. taeda*, presumiblemente debido al efecto de la zona donde se colocó (en contacto con las raíces). No obstante, ninguno de los 15 tratamientos de fertilización propuestos presentó

diferencias estadísticamente significativas en estas variables, después de 41 meses de aplicados los nutrimentos al suelo.

En México, Hernández *et al.* (2018) reportaron experiencias con *Pinus cooperi* Blanco [sinonimia de *Pinus arizonica* var. *cooperi* (C. E. Blanco) Farjon], de 2 años de edad, en Durango. Estos investigadores evaluaron el efecto de dosis de N (0-4-8 g árbol⁻¹ de urea), P (0.0-3.5-7.0 g árbol⁻¹ de superfosfato de calcio triple) y K (0.00-3.28-6.50 g árbol⁻¹ de sulfato de potasio), para lo que emplearon un diseño factorial y demostraron después de 2 años de aplicados los tratamientos que la combinación de P*K puede afectar positivamente el diámetro basal y el incremento en diámetro basal, la combinación de N*P afectó el incremento en diámetro basal y las combinaciones N*P N*K y N*P*K, el incremento en altura. Se encontró, además, que la fertilización afectó negativamente la biomasa de 100 acículas, con excepción de los tratamientos 7.0P+6.5K, 4.0N+3.5P y 4.0N+3.5P+6.50K, lo que sugiere la necesidad de conocer los requerimientos de las plantas para no generar desbalances nutrimentales.

Otros efectos reportados como consecuencia de la fertilización son el incremento de la productividad primaria aérea neta (y translocación de C), una mayor absorción de radiación fotosintéticamente activa, eficiencia en el uso de luz y de agua, aumento del área de conducción (albura), un incremento en la conductividad hidráulica y una mayor eficiencia de crecimiento (producción de fuste por unidad de área foliar), además de una disminución en la conductancia estomatal y un decremento en los flujos de C hacia las partes subterráneas, tanto a nivel de rodal como a nivel de árbol individual (Maier *et al.*, 2004; Campoe *et al.*, 2013; Bartkowiak *et al.*, 2015; Maggard *et al.*, 2017; Samuelson *et al.*, 2018). Asimismo, puede aumentar el contenido de clorofila y azúcares y disminuir el contenido de almidón en las acículas en *P. radiata* (Fife y Nambiar, 1997).

Resultados de otras investigaciones sugieren que la fertilización también puede aumentar el número y la elongación de brotes en setos de *P. radiata* (Hernández y Rubilar, 2012), disminuir los ataques por plagas al corregir deficiencias y aumentar el vigor de los árboles aunque en ocasiones también puede generar susceptibilidad a ellas (Chapell *et al.*, 1992; Binkley, 1993; Pérez C. *et al.*, 2013; López y Estañol, 2014), generar cambios en el pH y la conductividad eléctrica del suelo (Oliet *et al.*, 1999; Jacobs y Timmer, 2005) pudiendo afectar a la flora vascular del suelo (Misson *et al.*, 2001), puede promover mayores daños por herbivoría (Chapell *et al.*, 1992) además

de efectos contradictorios en la micorrización, la biomasa de raíces y su longitud (de 3er a 5to orden) (Hunt, 1989; Kou *et al.*, 2015), cambios en las características anatómicas y físico-mecánicas de la madera (Chapell *et al.*, 1992) y efectos temporales en la eutroficación de los cuerpos de agua (Binkley *et al.*, 1999).

En vivero se realiza la fertilización otoñal con dosis particulares a cada especie y etapa de crecimiento o a nivel exponencial para promover la calidad de las plántulas después del cese de crecimiento (Villar-Salvador *et al.*, 2015). Esta práctica se aplica en varias especies con la finalidad de promover una mejor nutrición, mayor crecimiento en primavera, elongación de las yemas terminales y, por el incremento de la cantidad de N, puede tener un nulo o muy ligero efecto en acelerar el rompimiento de las yemas en primavera (van den Driessche, 1985; Fløistad, 2002; Fløistad y Kohmann, 2004; Islam *et al.*, 2009; Pan *et al.*, 2017).

Los fertilizantes de liberación controlada se usan mayormente en la producción de planta en vivero, siendo sus principales efectos el aumento de la relación parte aérea/parte subterránea, el índice de esbeltez, el índice de Dickson y las concentraciones nutrimentales (Oliet *et al.*, 1999; Aguilera *et al.*, 2016a, 2016b; Bautista *et al.*, 2018; Castro *et al.*, 2018; González *et al.*, 2018), con mayor efectividad que las prácticas de fertilización tradicionales pasado algún tiempo (Walker y Hunt, 1999).

En estudios de campo, Haase *et al.* (2006) reportaron que, *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, presentaba crecimientos diferenciados en altura total, diámetro a la altura de pecho y hasta 3 años después de plantados y en biomasa de 100 acículas durante los 2 primeros años, considerando tratamientos basados en la fertilización convencional y el uso de fertilizantes de liberación controlada, siendo más eficientes éstos últimos.

Lo anterior concuerda con lo encontrado por Reyes-Millalón *et al.* (2012) en *P. radiata* quienes 4 años después de aplicados los tratamientos demostraron la eficiencia de los FLC en el crecimiento de la especie, resultados que también obtuvieron Vázquez *et al.* (2018) al evaluar, un año después del establecimiento, una plantación de *Pinus greggii* var. *greggii*. Sin embargo, también demostraron que algunos tratamientos no son estadísticamente diferentes a la aplicación de fertilizantes convencionales.

Para *P. patula*, en Sudáfrica, se tienen reportes de respuestas positivas en incremento del área basal como respuesta a la adición de P y K en plantaciones de 8 años, localizadas en diferentes tipos de material parental (Carlson, 2000). Estas deficiencias parecen ser resultado de la baja fertilidad de los suelos, fenómeno común en gran parte del sur del continente africano (Olbrich *et al.*, 1997).

En Zimbabue, la fertilización con P con dosis de 90 g árbol⁻¹ incrementó la altura en los primeros 2 años después de la fertilización; el diámetro el tercer año, y el diámetro y el volumen el séptimo año (último de la evaluación). En algunos sitios las aplicaciones de N y K no generaron respuestas significativas y, en ocasiones, hasta afectaron el crecimiento, situación que también se presentó al aplicar dosis más altas de P en estas áreas (Gotore *et al.*, 2014).

Suazilandia es un país con experiencia en el tema. Inició sus trabajos en 1968, en el bosque Usutu, debido a la reducción en un 18% de la productividad, cuando empezaba la segunda rotación. Los investigadores encontraron que, en 13% de la superficie total del bosque, el material parental corresponde al glabro, el cual limita la disponibilidad de P y K generando deficiencias en los árboles plantados en esa zona (Evans, 2005; Titshall *et al.*, 2013).

Experiencias con aplicaciones de N, P, K y sus combinaciones en plantaciones de 3, 6 y 11 años de edad demostraron la efectividad de la fertilización relacionada con el material parental (Morris, 2003). Así también, se logró relacionar las concentraciones foliares con el incremento en volumen, resaltando la necesidad de un suministro adecuado de K, P y Na para mantener la productividad de los árboles (Crous *et al.*, 2008).

Posteriores investigaciones permitieron observar que existía un efecto residual de las aplicaciones entre rotaciones, observables en las variables morfológicas (Crous *et al.*, 2007a), concentraciones nutrimentales foliares, troncales y en la corteza, la disponibilidad de nutrimentos en el suelo (Crous *et al.*, 2007b, 2011a, 2011b) y, además, de efectos ligeros en la uniformidad en el diámetro de los rodales y densidad básica de la madera (Crous *et al.*, 2009a, 2009b). El efecto se prolongó, hasta 15 años después de aplicado el fertilizante. Los resultados experimentales hicieron posible determinar que 20 kg ha⁻¹ de P y K, al establecimiento, y 75 kg ha⁻¹ de esos nutrimentos, al momento de una primera poda (a los 5 o 6 años), pueden evitar la reducción de la productividad y promueven un mayor crecimiento en estas plantaciones (Mavimbela *et al.*, 2018).

En México, se tienen pocos estudios sobre la fertilización de *P. patula* a nivel de campo. Uno de ellos fue realizado por Lázaro *et al.* (2012) quienes probaron la aplicación de N (0-138-185 kg ha⁻¹), P (0-15-21 kg ha⁻¹) y K (0-123-164 kg ha⁻¹) a dosis factoriales en una plantación de 10 años de edad en Aquixtla, Puebla, encontrándose que el N fue el elemento que generó mayor respuesta en el volumen del follaje nuevo (tratamiento 185-0-0) y en el peso seco (135-0-0) además de que, en esta última variable, la combinación con K a razón de 135-0-123 tuvo una interacción importante con la absorción de N por los árboles.

López y Estañol (2014) hallaron, en plantaciones de la misma edad en Huayacocotla, Veracruz, efectos importantes en el incremento del diámetro y la biomasa del fuste, derivados de la aplicación de N, P y K en dosis de 333, 109 y 188 g árbol⁻¹, concluyendo que el N y el P eran deficientes, además de que se registró una reducción del daño por *Sphyrpicus varius* (Linnaeus) debido al aumento del vigor de los árboles tratados.

Sin embargo, en el mismo municipio, Vásquez *et al.* (2015) no encontraron diferencias significativas por la aplicación de fertilizantes (NPK) en la biomasa de follaje, fuste y ramas, productividad primaria neta, ni producción de hojarasca en dos plantaciones, al momento de ser evaluadas un año después, aunque el aclareo sí tuvo importancia en las primeras tres variables en la plantación con 13 años de edad. La falta de respuesta fue atribuida a la competencia por nutrimentos y luz, por la presencia de malezas y las altas densidades arbóreas.

Finalmente, es de considerar que las respuestas más rápidas a la fertilización se pueden observar en plántulas de vivero, donde también influye el tipo de sustrato, los tipos y marcas de fertilizantes y contenedores utilizados (Luis *et al.*, 2004; Bautista *et al.*, 2018; González *et al.*, 2018), en plantaciones recién establecidas con árboles jóvenes, que son sensibles a los efectos de control de malezas y preparación del suelo (Cañellas *et al.*, 1999; Albaugh *et al.*, 2004; Ibañez *et al.*, 2004), o rodales con deficiencias considerables (Albaugh *et al.*, 2012, 2017), con respuestas observables a partir de los 8 meses y, en ocasiones, hasta después de 4 años de aplicados los tratamientos (Binkley *et al.*, 1995; Oliet *et al.*, 1999; Jokela *et al.*, 2010; León *et al.*, 2016).

2.5. Mejoramiento Genético Forestal y avances en *P. patula*

La base del mejoramiento genético reside en el aprovechamiento, selección y manipulación de la variación natural que existe, la cual se debe aislar y transmitir al árbol con la finalidad de mejorar la calidad de los bosques, para obtener los mayores rendimientos de madera, de la calidad deseada, en el menor tiempo y costo posible, desarrollar individuos que puedan utilizarse en sitios pobres o inadecuados para la producción forestal, que sean más resistentes a plagas y enfermedades o que posean características más adecuadas para ser utilizados para ciertos productos o usos (Zobel y Talbert, 1984; Willan, 1988; Willan *et al.*, 1989).

A la expresión visible y medible de la variación genética se le conoce como fenotipo, mientras que el genotipo es el potencial genético que tiene un árbol y está determinado por los genes dentro de su genoma (Zobel y Talbert, 1984; White *et al.*, 2007).

Cada genotipo es diferente y depende del género y la especie (además de sus variedades) (variación evolutiva), la procedencia y el rodal (variación geográfica; involucra procedencias, razas, clinas y ecotipos), el individuo y hasta las variaciones dentro del mismo (variación intrapoblacional y variación por desarrollo). La variación genética es resultado del mecanismo natural de la herencia junto con la ocurrencia de los cuatro procesos evolutivos: mutación, migración, deriva genética y selección natural (Willan *et al.*, 1989; White *et al.*, 2007).

El efecto ambiental incluye toda la variación de tipo no genético y es la expresión derivada de la interacción de todos los factores bióticos y abióticos que concurren en la zona donde se encuentra el individuo. La combinación del clima, el suelo, la densidad de un rodal, las plagas y enfermedades, el manejo silvícola, la elevación, la pendiente, entre otros, contribuyen enormemente a la variedad de respuestas fenotípicas que pueden observarse en los árboles (White *et al.*, 2007).

Los diversos ambientes producirán efectos distintos para el mismo genotipo, lo que se denomina interacción genotipo x ambiente (GxA) (Falconer y Mackay, 1996). Li *et al.* (2017) indican que, en todo el mundo se han realizado experimentos con varias especies de interés comercial, analizado la interacción GxA en rasgos de crecimiento, forma y propiedades, y densidad de la madera. La revisión que realizan estos autores indica que para los rasgos de crecimiento suele existir una alta interacción GxA; la rectitud de fuste, el ángulo y tamaño de ramas, el hábito de ramificación y las malformaciones presentan resultados variados para la

interacción GxA; y las características de la madera en coníferas como densidad básica, velocidad acústica, módulo de elasticidad, química, gravedad específica y canales resiníferos tienen baja interacción GxA.

Uno de los aspectos de manejo que puede generar este tipo de interacciones es la fertilización. Grandes diferencias en el crecimiento pueden presentarse por la aplicación de fertilizantes tanto a nivel de especie como a nivel de familia. La identificación de genotipos que no responden a la fertilización o, incluso, que respondan negativamente permite evitar su uso en plantaciones a nivel operativo. Así también es posible que se logre diferenciar genotipos que son tolerantes a las deficiencias nutrimentales y puedan ser utilizados en suelos inadecuados (Zobel y Talbert, 1984).

Las recolectas de semilla de individuos seleccionados pueden servir para el establecimiento de huertos semilleros o pruebas de progenie, éstas últimas son primordiales para llevar a cabo un programa de mejoramiento genético (Vargas y López, 2004). La progenie es la semilla producida por un árbol. Si sólo se conoce al árbol madre los individuos se clasifican como familias de medios hermanos, si se conocen ambos padres como familias de hermanos completos y, según cuáles se utilicen, se obtendrán los valores de cruzamiento de uno o de los dos padres, o los valores para cruces específicas entre ellos (Aptitud Combinatoria General y Aptitud Combinatoria Específica) (White *et al.*, 2007).

Los ensayos de progenie pueden utilizarse en el proceso de mejora genética ya sea maximizando el rendimiento al utilizar genotipos apropiados para cada tipo de suelo y clima, optimizando los diseños de cruzamiento al ocupar genotipos que generen cruces superiores e incrementando la ganancia para un posterior ciclo de selección que permita la creación de índices de selección (White *et al.*, 2007).

Los datos obtenidos de campo deben evaluarse estadísticamente para obtener los componentes de la varianza, lo que permite la estimación de los parámetros genéticos (Aptitud Combinatoria General, heredabilidades, correlaciones fenotípicas y genéticas, entre otros). El paquete estadístico SAS®, permite considerar tres métodos, GLM, VARCOMP y MIXED, siendo este último el más adecuado cuando se analizan modelos estadísticos mixtos. El procedimiento MIXED estima los componentes de varianza por tres aproximaciones, sin embargo, el método de máxima verosimilitud restringida (REML, por sus siglas en inglés) resulta ser el más apropiado para obtener estimaciones no sesgadas de estos datos (Vargas y López, 2004; Littell *et al.*, 2006).

Los ensayos de progenie suelen establecerse como experimentos en bloques completamente al azar (Vargas y López, 2004). Generar bloques en un experimento ayuda a minimizar el efecto de la variabilidad en las unidades experimentales debido a que el criterio que se utiliza es buscar que estos sean lo más homogéneos posibles (Littell *et al.*, 2006).

En los ensayos, los bloques y las familias dentro de ellos suelen considerarse como efectos aleatorios, mientras que los sitios de plantación y agrupaciones genéticas como efectos fijos. Todas aquellas interacciones existentes que contengan un efecto aleatorio, incluyendo aquellas que son efectos fijos (*v. gr.* Bloques x Grupos genéticos) también se consideran como efectos aleatorios. Solo aquellas que sean producto de efectos fijos mantendrán esta condición (*v. gr.* Sitios de Plantación x Grupos Genéticos) (Salaya *et al.*, 2012).

En la actualidad, numerosos programas de mejoramiento genético han sido implementados en todo el mundo. En el caso de las coníferas, se tienen reportes de trabajos que han buscado mejorar especies de los géneros *Pinus*, *Picea*, *Pseudotsuga*, *Larix*, *Cupressus*, *Cryptomeria*, *Chamaecyparis*, *Thuja* y *Cunninghamia*, con diversos objetivos de cruzamiento con relación a su importancia económica y su forma de utilización (Mullin *et al.*, 2011).

P. patula generó interés por ser utilizada ampliamente en plantaciones en todo el mundo, después de ser introducida en Sudáfrica, en 1907, y observar su desempeño potencial como especie exótica. Eso llevó al inicio del establecimiento de varias pruebas de progenie en varios países africanos en los años 70's, con el objeto de iniciar el proceso de mejoramiento genético de la especie (Wormald, 1975; Dvorak *et al.*, 2000).

Numerosos trabajos en África han sido realizados para estimar heredabilidades y correlaciones en algunas variables como el número de cotiledones, el número de ramas, el número de verticilos, la altura, el diámetro, la forma del fuste, el volumen y la densidad de la madera, tanto a nivel de vivero (Barnes y Schweppenhauser, 1978) como a nivel de campo (Kageyama *et al.*, 1977; Barnes y Schweppenhauser, 1979; Barnes *et al.*, 1992a, 1992b; Wright, 1994).

En países como Colombia, Brasil y Sudáfrica pudo demostrarse también la variabilidad entre las poblaciones, al comparar el desempeño de familias introducidas, mejoradas y recolectadas de poblaciones naturales en México, mediante el establecimiento de pruebas de procedencias (Kageyama *et al.*, 1977; Ladrach y Lambeth, 1991; Wright *et al.*, 1995). Los resultados demostraron la existencia de diferencias en la resistencia a plagas (*Pineus* spp.), velocidad y

crecimiento total, altura, diámetro, forma del fuste y densidad de la madera, encontrando también interacción GxA.

Pruebas establecidas en Brasil, Colombia y Sudáfrica por la Cooperativa de Investigación de América Central (CAMCORE, en inglés), que tomaron como base 282 familias de 13 procedencias del rango de distribución natural de *P. patula* en México, demostraron que, de manera general, las procedencias del centro del país (Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz) son más productivas que las del sur (Oaxaca). Particularmente, las recolectas realizadas en Zacualtipán (Hidalgo), Pinal de Amoles (Querétaro) y Zacatlán (Puebla) presentaban buenos crecimientos en todos los sitios, aunque Potrero de Monroy (Veracruz) presentaba los mayores crecimientos junto con las dos primeras (Dvorak *et al.*, 1995; Dvorak *et al.*, 2000).

En México algunos de los primeros ensayos genéticos involucraron la reintroducción de genotipos provenientes de Sudáfrica, los cuáles fueron plantados en dos sitios denominados “Huayacocotla” y “Oxtlapa”, en Veracruz, y fueron comparados con genotipos locales como control. El desempeño de los individuos al momento de la evaluación del experimento permitió observar la ganancia genética en atributos como la altura, el diámetro, número total de verticilos, ancho de copa, rectitud del fuste, fenología y daño por heladas, que tenían las familias de segunda generación de mejoramiento. El único atributo en el cual los genotipos locales tenían mejor desempeño fue el ángulo de ramas (Sáenz-Romero *et al.*, 1994).

La plantación “Huayacocotla” fue evaluada posteriormente a los 6 años de edad por Valencia *et al.* (1996), quienes volvieron a calcular las heredabilidades y evaluaron también la densidad de la madera. Estos autores, encontraron que las heredabilidades individuales (h_i^2) en el crecimiento y la densidad de la madera eran bajas o moderadas, mientras que las heredabilidades a nivel familiar (h_f^2) para las mismas variables, presentaban un control genético moderado a moderado-alto. Por su parte, Valencia y Vargas (2001), para la misma plantación, encontraron correlaciones genéticas y fenotípicas positivas entre las variables de crecimiento, pero genéticas negativas cuando éstas fueron evaluadas con relación a la densidad de la madera y la proporción de madera tardía.

Como se presentó en casos de otros países, *P. patula* también mostró diferencias en su crecimiento en procedencias nativas evaluadas en Huauchinango, Puebla. Los análisis realizados por Salazar *et al.* (1999) mostraron que la altitud de la procedencia influía negativamente en el

crecimiento anual en altura y el número de ciclos de crecimiento en el año, y que éstas dos características se correlacionaban positivamente. Las procedencias de menor elevación tenían mayor altura debido a una mayor cantidad de ciclos de crecimiento en el año.

Salaya *et al.* (2012), evaluaron dos ensayos de progenies en Aquixtla y Acaxochitlán, Puebla, compuestos por 36 familias de polinización libre, 18 provenientes de Colombia y Sudáfrica y 18 de procedencias locales, a los 5 y 6 años de edad. Entre sus resultados encontraron que los sitios influían en el crecimiento en diámetro, altura y volumen de las familias evaluadas, sin embargo, los grupos de familias no eran diferentes entre sí; esta situación no fue así en el caso del análisis por sitio, donde las procedencias locales eran mejores en Aquixtla, pero inferiores en Acaxochitlán en comparación con los genotipos mejorados.

Morales *et al.* (2013) también analizaron dos ensayos de progenies los cuales están ubicados en dos parajes (Chichicaxtla y Sierra Mojada) dentro de un Conjunto Predial en Aquixtla. La altura, diámetro a 30 cm, número de verticilos, diámetro y volumen, después de 5 años, sólo presentaron diferencias estadísticamente significativas en el paraje Chichicaxtla. Con relación a las correlaciones genéticas y fenotípicas, se observó que éstas fueron positivas, en su mayoría de altos valores.

Para el caso del paraje Chichicaxtla, Escobar *et al.* (2018) analizaron características de la madera de las familias establecidas en ese ensayo de progenies a los 8 años, encontrando que en su mayoría las correlaciones genéticas fueron moderadas y positivas, pero eran bajas y negativas al relacionar las variables relacionadas con la ramificación y el crecimiento.

Bustillos *et al.* (2018) realizaron una nueva evaluación del ensayo en Sierra Mojada después de 7 y 10 años, incluyendo algunas características de ramificación de los árboles. Sus resultados indicaron valores de h_i^2 de moderados a bajos, mientras que las h^2 tenían un control genético moderado a excepción de los defectos, los individuos con ramas ramicórmicas, los árboles con bifurcaciones y, para los 10 años, el número de verticilos. Las correlaciones genéticas presentaron una tendencia similar que en Chichicaxtla, en su mayoría fueron moderadas y positivas entre las variables de crecimiento, y bajas y negativas entre el crecimiento y las características de ramificación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Área de estudio

El ejido de Peñuelas Pueblo Nuevo está localizado en las coordenadas centrales 19° 57' 21" latitud Norte y 98°06'40" longitud Oeste, en la Sierra Norte de Puebla en un rango altitudinal de los 2,650 a 3,100 m. La comunidad es pequeña, cuenta con 553 habitantes, 273 hombres y 280 mujeres que habitan en 129 viviendas (Pérez *et al.*, 2017).

El clima que predomina en la zona es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de 13.5°C y precipitación de entre 750 y 1,000 mm en las partes bajas y altas, respectivamente (Pérez *et al.*, 2017). Los suelos predominantes de la zona son los Durisoles y Andosoles (INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática), 2013).

La superficie total del ejido corresponde a 1,691 ha entre áreas agropecuarias, urbana y boscosas de clima templado frío. Cerca de 911 ha del bosque se encuentran manejadas con el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), de las cuales 903.66 ha se encuentran certificadas por el Forest Stewardship Council (FSC) (Pérez *et al.*, 2017). En este bosque se pueden encontrar varias especies de pinos (*P. patula*, *Pinus montezumae* Lamb., *P. ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote* y plantaciones de *P. greggii*), encinos (*Quercus* spp.) y oyamel (*Abies religiosa*).

La experiencia forestal del ejido, con apoyo y reconocimiento de dependencias federales como CONAFOR y SEMARNAT, le ha valido la designación de Comunidad Instructora o Comunidad Escuela. Como parte de su desarrollo ha incorporado a su infraestructura un vivero forestal de 5 hectáreas, con capacidad para producir cinco millones de plantas, instalaciones y maquinaria de beneficio de semillas, un laboratorio de análisis de semillas, una cámara fría, un banco de germoplasma con material de 100 árboles semilleros de características sobresalientes, dos huertos semilleros, un huerto clonal, un aserradero ejidal y transportes y maquinaria pesada (Pérez *et al.*, 2017).

3.2. Ensayo de progenies

El ejido ya tiene experiencia forestal y ha iniciado proyectos para la mejora genética de *P. patula*, entre estos se encuentra el establecimiento de un ensayo de progenies en el mes de septiembre de 2015 en el predio Agua Prieta, el cual consta de una superficie aproximada de 2 ha y está ubicado en los límites de los municipios de Chignahuapan y Zacatlán, Pue. (Figura 3).

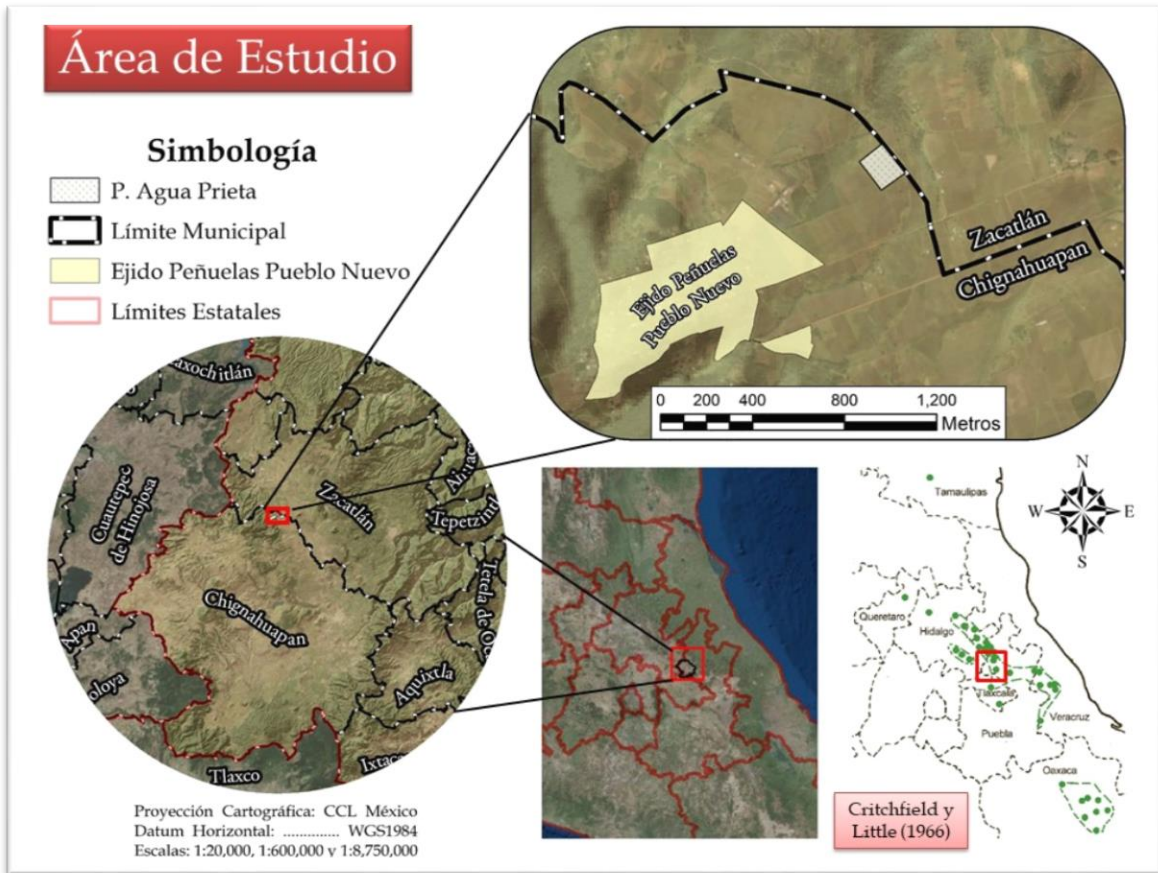


Figura 3. Localización del ensayo de progenies de *Pinus patula* en el ejido de Pueblo Nuevo, Chignahuapan, Puebla. Elaboración propia con datos de Critchfield y Little (1966); INEGI (2018) y Earle (2020).

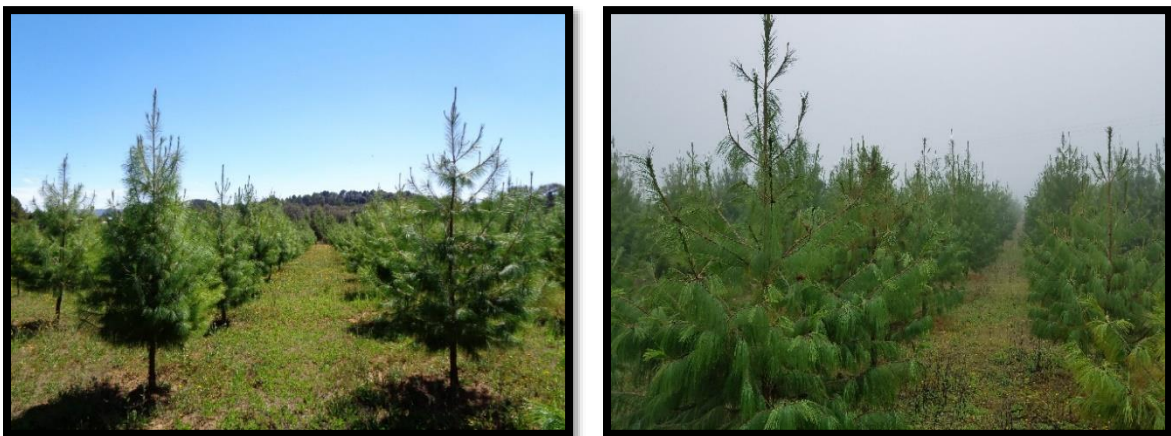


Figura 4. Detalle del ensayo de progenies de *Pinus patula* y espaciamento entre árboles.

La plantación se encuentra dispuesta en un total de 20 bloques, cada uno compuesto por un grupo de 100 individuos colocados aleatoriamente a marco real a 3 x 3 m (Figura 4). Cada

individuo es parte de una familia de árboles de características fenotípicas sobresalientes, seleccionados en el bosque perteneciente al ejido (20°00'11" N, 98°07'48" O, 2,894 m de elevación). Adicionalmente, cuenta con una hilera de árboles adicional en todo su perímetro que promueve la competencia total de los individuos contenidos dentro de los bloques (Figura 5).

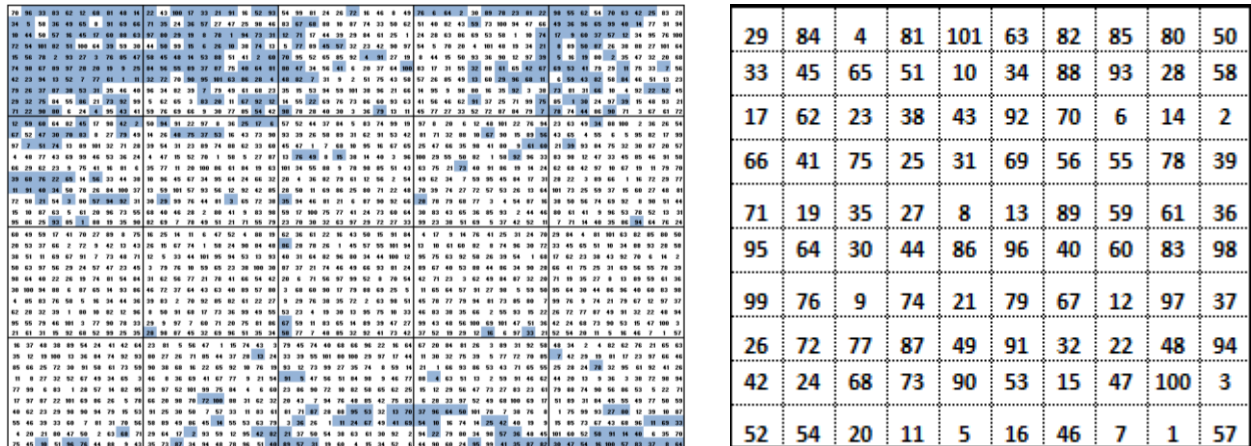


Figura 5. Disposición de los 20 bloques del ensayo en campo. En azul, registro de árboles muertos a inicios de 2018 (Izquierda). Disposición ejemplo de las 100 familias en cada bloque del ensayo de progenies de *Pinus patula*. Cada bloque presenta una aleatorización diferente (Derecha).

3.3. Establecimiento del experimento y tratamientos aplicados

Previo al establecimiento del experimento, se realizó una evaluación en julio de 2018 de la condición de los bloques y árboles de la plantación, encontrándose que 12 de los 20 bloques presentaban condiciones más homogéneas entre ellos. Con el objeto de disminuir el sesgo por condiciones externas al desempeño fisiológico de los árboles, se procedió a trabajar con estos bloques.

Para proponer los tratamientos de fertilización a aplicar se realizó un muestreo diagnóstico de suelo y de tejido foliar (Anexos 1 y 2). Se recolectaron 10 muestras de suelo, de los primeros 30 cm, obtenidas al azar a lo largo de los 12 bloques considerados, que posteriormente fueron mezcladas de forma homogénea, se secaron y se prepararon tres muestras compuestas para ser llevadas a laboratorio (Figura 6). Los análisis químicos de suelo (pH, conductividad eléctrica, determinación de materia orgánica, N total, nitratos, nitritos, P, Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn), densidad real, densidad aparente y textura fueron determinados en el Laboratorio de Nutrición Vegetal “Salvador Alcalde Blanco” del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Por otro lado, se solicitó también obtener la información de las curvas de retención de humedad para las

mismas muestras; este procedimiento se realizó en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Todas las determinaciones se realizaron conforme lo dispuesto en la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002).



Figura 6. Obtención de las muestras de suelo para su análisis de laboratorio.

El tejido foliar se obtuvo de tres individuos “Sobresalientes” y tres “No sobresalientes”, clasificados de esta forma según su expresión fenotípica. La recolecta se realizó de acuerdo a lo sugerido por Wells y Allen (1985), Ballard y Carter (1986) y Brockley (2001), y se realizó a finales de verano (Figura 7). Las muestras se secaron en estufa durante 3 días a 70 °C, se molieron y se analizaron en el Laboratorio de Nutrición Vegetal “Salvador Alcalde Blanco” en donde se determinaron las concentraciones de N, por el método micro-Kjeldahl, y de P, K, Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, Mn y B por espectrometría de emisión óptica de inducción de plasma acoplado (Varian ICP OES 725-ES; Mulgrave, Australia), utilizando digestiones con una mezcla de H₂SO₄:HClO₄ (2:1, v:v) de acuerdo a la metodología descrita por Alcántar y Sandoval (1999).

Se definieron cuatro tratamientos de fertilización. El primero (Tratamiento 1) fue el testigo que consistió en no aplicar ningún fertilizante. Con los resultados obtenidos de los muestreos (Anexos 1 y 2), principalmente de las muestras foliares, se propuso un tratamiento de fertilización tendiente a la corrección de las deficiencias nutrimentales encontradas. Considerando lo reportado por Sánchez *et al.* (2018), se determinó que el Ca, Fe, Zn y Mn se encontraban en concentraciones insuficientes en el ensayo, de forma que el tratamiento a aplicar buscaría corregir estas deficiencias. Los fertilizantes en presentación líquida utilizados fueron Sagaquel® en sus variantes de Ca (91 mL árbol⁻¹), Mn (53 mL árbol⁻¹), Zn (10 mL árbol⁻¹) y Fe (5 mL árbol⁻¹) (Tratamiento 2).



Figura 7. Obtención de las muestras de tejido foliar de árboles de *Pinus patula* para su análisis de laboratorio.

El tercer tratamiento se definió de una forma empírica, tomando como base otros trabajos de fertilización en especies relacionadas y condiciones similares (Cañellas *et al.*, 1999; Rubilar *et al.*, 2008a; Štofko, 2010; Reyes-Millalón *et al.*, 2012; Vázquez *et al.*, 2018). Partiendo de esta información, se consideró que el tratamiento a aplicar consistiría en 20 g árbol⁻¹ del fertilizante de liberación controlada Multicote Agri (8) ® (18-6-12 + 2CaO + 3.5 Mg + 2.1 Si + ME), el cual tiene un tiempo de liberación de 8 meses, en función de la humedad y la temperatura del suelo (Tratamiento 3).

El último tratamiento fue establecido como contraparte del anterior, partiendo del uso de fertilizantes agrícolas tradicionales que pudieran asemejarse a las concentraciones del fertilizante de liberación controlada, de forma que pudiera realizarse una comparación sobre la efectividad de respuesta en el crecimiento de los árboles tratados, según el tipo de fertilizante aplicado (Tratamiento 4) (Cuadros 1 y 2).

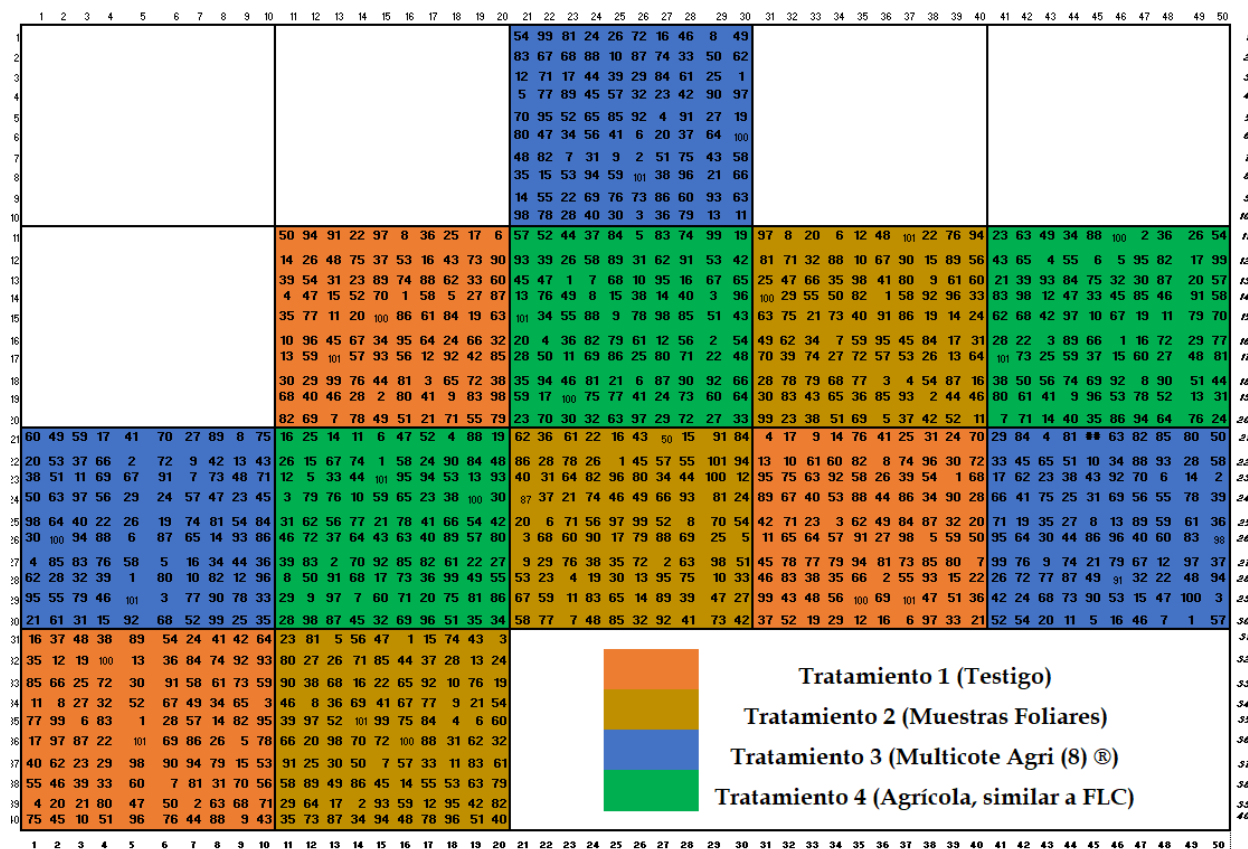
Cuadro 1. Cantidades de fertilizante adicionado en el tratamiento de comparación con el fertilizante de liberación controlada en g árbol⁻¹ y mL árbol⁻¹, según el caso.

Tratamiento 4	Urea	Fosfonitrato	Sulfato de Magnesio	Nitrato de Potasio	Sulfato de Cobre
g árbol ⁻¹	4.32	2.76	2.46	5.22	0.04
	Ácido fosfórico	Sagaquel Ca	Sagaquel Mn	Sagaquel Zn	Sagaquel Fe
mL árbol ⁻¹	1.55	0.87	2.29	0.13	0.24

Cuadro 2. Comparación de las cantidades de nutrimento, en g totales, en cada tratamiento.

Tipo de fertilizante	N-NO ₃		N-NH ₄	P	K	Ca	Mg	Si
	S	Fe						
Multicote Agri (8)	1.160	2.440	0.523	1.992	0.286	0.422	0.420	
Agrícolas	1.160	2.440	0.523	1.992	0.286	0.422	0.000	
Multicote Agri (8)	0.000	0.08	0.011	0.009	0.002	0.012	0.006	
Agrícolas	0.324	0.08	0.011	0.009	0.000	0.012	0.029	

Los cuatro tratamientos ensayados se denominaron: control (1), técnico (2), fertilizante de liberación controlada (3), fertilización agrícola tradicional (4). Los tratamientos se aleatorizaron a nivel de bloque de 100 árboles, de forma que cada tratamiento contó con tres repeticiones (Figura 8).



Los tratamientos de fertilización fueron aplicados a mediados del mes de septiembre de 2018. Tanto el Tratamiento 2 como el Tratamiento 4 fueron diluidos en agua y aplicados en la zona de goteo de las copas de los árboles, mientras que en el caso del Tratamiento 3, los gránulos del fertilizante fueron depositados en la parte superficial del suelo, en los cuatro puntos cardinales alrededor del individuo y, posteriormente, cubiertos para garantizar que la humedad y la temperatura del suelo los disolvieran (Figura 9).

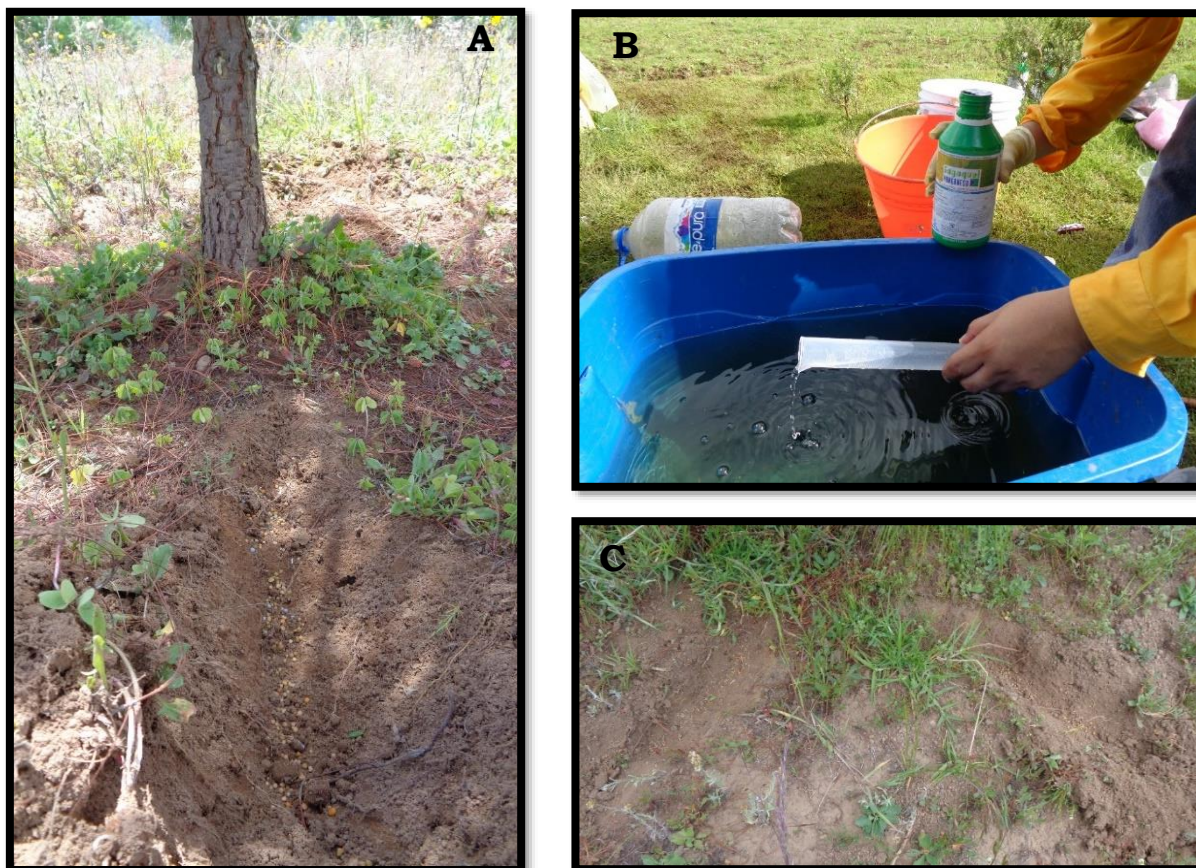


Figura 9. A) detalle de la apertura del suelo y forma de aplicación del fertilizante de liberación controlada (Tratamiento 3), B) preparación de solución fertilizante (Tratamientos 2 y 4) y C) dos de las aperturas en el suelo en los puntos cardinales del árbol.

A pesar de que la fertilización fue aplicada a los 100 individuos del bloque, solamente fueron seleccionados 20 árboles o familias basados en su desempeño en altura hasta el mes de marzo de 2018. Los 10 árboles con la mayor altura registrada para esa fecha se agruparon en la categoría “Genotipos Superiores”, mientras que los 10 árboles con menor altura fueron clasificados como “Genotipos Inferiores”.

3.4. Medición de las variables morfológicas y fenología

Después de la fertilización, se realizó una primera medición en el mes de octubre de 2018 para conocer las condiciones en las que se encontraban los individuos. Se midieron el diámetro al cuello de la raíz (DCR), el diámetro a la altura de pecho (DAP, en los árboles que contaban con él), la altura total (ALT) y el número de verticilos totales (VERT). Los diámetros fueron medidos con ayuda de una cinta diamétrica marca Lufkin® de 2 m de largo, mientras que la altura se midió con ayuda de un estadal marca Apex® de 5 m de altura (Figura 10). La segunda medición se realizó en noviembre del 2019, pasado poco más de un año de la medición inicial.

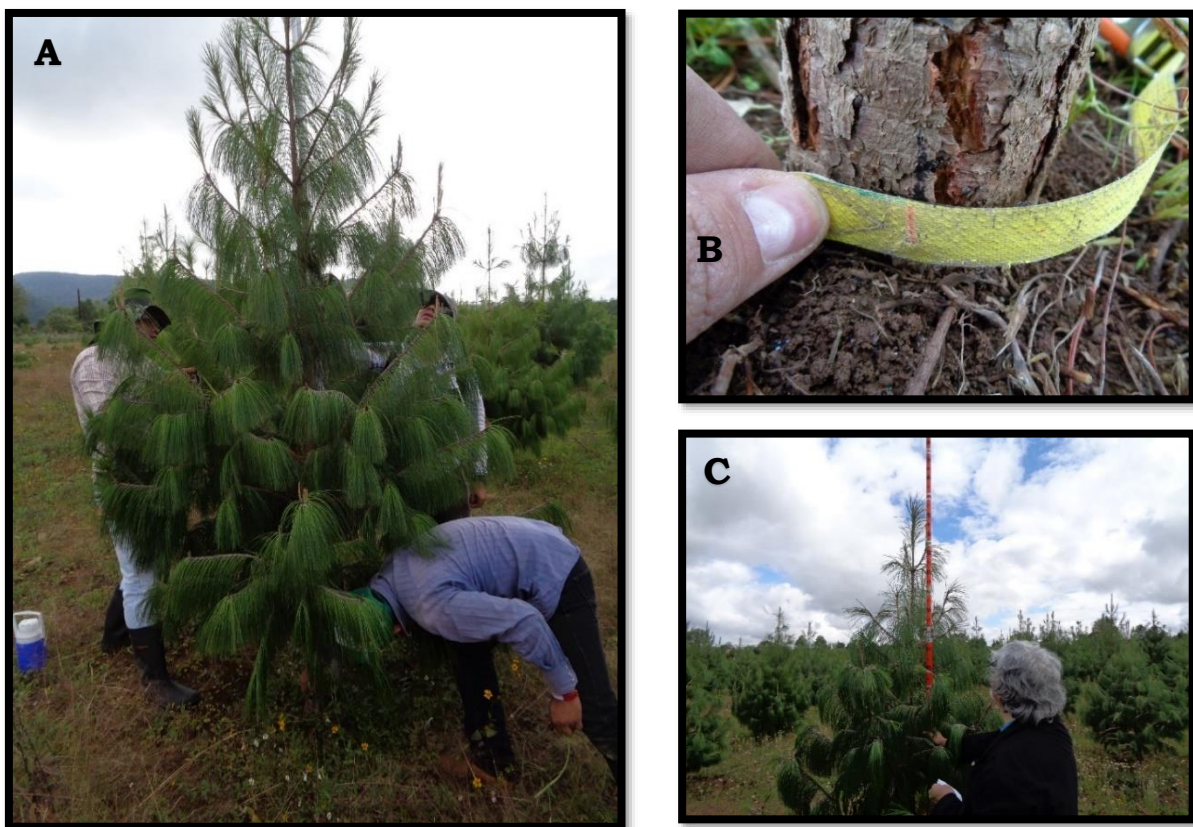


Figura 10. A) medición completa de un árbol individual, B) detalle de la medición del diámetro al cuello de la raíz con cinta diamétrica, C) detalle de la medición de altura con estadal.

Como medida complementaria, se evaluó la condición fenológica de la yema terminal de los árboles. Las mediciones se realizaron en cuatro salidas durante febrero de 2019, los días 07, 11, 18 y 25, para el determinar el inicio del crecimiento (YEMA_IN) mientras que en el caso de octubre se hicieron cinco salidas los días 01, 11, 21 y 30 de octubre, y 14 de noviembre de 2019, para determinar el cese del crecimiento en altura (YEMA_F).

3.5. Recolecta y pesado de muestras foliares

Las muestras fueron secadas durante tres días en estufa a 70°C para, posteriormente, separar 100 acículas de las cuáles se obtuvo su masa (MASA_100) utilizando una báscula de precisión a centésimas de gramo (Chyo® JK-200, Chyo Balance Corp., Japan).

Las variables evaluadas fueron la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa relativa de producción (TRP) para el diámetro al cuello de la raíz (cm) (DCR), el diámetro a la altura de pecho (cm) (DAP), la altura total (cm) (ALT), el número de verticilos (VERT) y el índice de biomasa (dm³) (IB = DCR² * ALT), además de la masa de 100 acículas (g) (MASA_100), las fechas de inicio (YEMA_IN) y cese de crecimiento (días julianos) (YEMA_F). Para la obtención de las tasas de crecimiento se utilizaron las fórmulas propuestas por Hunt (1990):

$$TCA = \frac{(W_2 - W_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

$$TRP = \frac{\ln(W_2/W_1)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

En donde: TCA = es el incremento total promedio para un intervalo definido, TRP = es la tasa relativa de producción promedio para un intervalo definido, $W_{1,2}$ = incremento corriente y del período anterior, de la variable evaluada (usualmente peso; en este caso, DCR, DAP, AT, VERT) y $t_{1,2}$ = fechas de medición inicial y final (intervalo de tiempo; en este caso, un año).

3.6. Diseño experimental y análisis estadístico

El modelo estadístico utilizado corresponde a:

$$y_{ijkl} = \mu + T_l + B_{i(l)} + G_j + TG_{jl} + BG_{ijl} + F_{k(j)} + TF_{jkl} + \varepsilon_{ijkl} \quad (5)$$

En donde: y_{ijkl} = es el valor observado en la variable evaluada del individuo de la k -ésima familia, dentro del j -ésimo grupo genotípico, en el i -ésimo bloque anidado en el tratamiento l -ésimo de fertilización; μ = es la media poblacional; T_l = es el efecto fijo del l -ésimo tratamiento de fertilización aplicado; $B_{i(l)}$ = es el efecto aleatorio del i -ésimo bloque anidado en el l -ésimo tratamiento de fertilización $\sim NID(0, \sigma_b^2)$; G_j = es el efecto fijo del j -ésimo grupo genotípico de árboles; TG_{jl} = es el efecto fijo de la interacción entre el tratamiento de fertilización y el grupo genotípico; BG_{ijl} = es el efecto aleatorio de la interacción entre la repetición y el grupo genotípico $\sim NID(0, \sigma_{bg}^2)$; $F_{k(j)}$ = es el efecto aleatorio de la k -ésima familia anidada en el grupo genotípico

$\sim NID(0, \sigma_{f(g)}^2)$; TF_{jkl} = es el efecto aleatorio de la interacción entre el bloque y la familia dentro del grupo genotípico $\sim NID(0, \sigma_{tf}^2)$; y ε_{ijkl} = es el error asociado a dichos efectos $\sim NID(0, \sigma_e^2)$; l = control (T1), técnico (T2), fertilizante de liberación controlada (T3) y fertilizantes agrícolas tradicionales (T4); i = bloques 1, 2 y 3 por tratamiento; j = genotipos superiores y genotipos inferiores; k = 10 familias por cada grupo genético.

El análisis de los datos se realizó con el paquete PROC MIXED del programa estadístico SAS 9.4®. Este procedimiento permite determinar los componentes de varianza del modelo a través del método Restricted Maximum Likelihood (REML), de forma que se pueda determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en el modelo. Así también, se evalúan las diferencias de mínimos cuadrados entre los tratamientos de fertilización y grupos genotípicos utilizando una prueba de t , para definir si son estadísticamente diferentes (Littell *et al.*, 2006; SAS Institute, 2015).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

La aplicación de fertilizantes en esta plantación no mostró un efecto significativo sobre ninguna de las variables evaluadas (Cuadro 3). En cambio, la condición genética sí influyó en la tasa de crecimiento absoluto y en la tasa relativa de producción del índice de biomasa ($p \leq 0.01$), así como en las tasas relativas de producción de la altura total y el diámetro al cuello de la raíz ($p \leq 0.05$). Por su parte, la tasa de crecimiento absoluto del diámetro a la altura de pecho y el inicio del crecimiento fueron significativamente diferentes con $p \leq 0.09$ (Cuadro 3).

De manera particular, para la tasa relativa de producción del diámetro al cuello de la raíz y del índice de biomasa existió una interacción significativa entre los tratamientos de fertilización y el grupo genético. Esta situación también sucedió para la tasa relativa de producción de la altura, pero a una significancia menor ($p \leq 0.10$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Significancia estadística de los efectos evaluados derivados del análisis de varianza para la tasa de crecimiento absoluto (TCA) y la tasa relativa de producción (TRP) de la altura total (ALT), diámetro al cuello de la raíz (DCR), índice de biomasa (IB) y diámetro a la altura de pecho (DAP), número de verticilos (VERT), la masa de 100 acículas (MASA_100) y el inicio (YEMA_IN) y cese del crecimiento (YEMA_F).

Efecto	TCA	TRP	TCA	TRP	TCA	TRP	TCA	TRP
	ALT	ALT	DCR	DCR	IB	IB	DAP	DAP
Pr > F								
Tratamiento	1.00	0.57	0.73	0.80	0.83	0.74	0.87	0.33
Grupo Genotípico	0.52	0.02*	0.24	0.03*	0.01**	0.01**	0.09†	0.30
Tratamiento x Grupo Genotípico	0.83	0.10†	0.72	0.05*	0.54	0.02*	0.51	0.52

Efecto	TCA_VERT	TRP_VERT	MASA_100	YEMA_IN	YEMA_F
	Pr > F				
Tratamiento	0.72	0.83	0.68	0.94	0.37
Grupo Genotípico	0.18	0.95	0.55	0.09†	0.53
Tratamiento x Grupo Genotípico	0.92	0.92	0.45	0.59	0.92

†: $p \leq 0.10$; *: $p \leq 0.05$; **: $p \leq 0.01$.

Las medias calculadas permiten observar la falta de respuesta significativa entre los tratamientos de fertilización, reafirman las diferencias estadísticas encontradas para los grupos genéticos en la evaluación del modelo y permiten observar una tendencia positiva en el crecimiento absoluto para la combinación del Tratamiento 3 y el grupo genotípico superior. Como se esperaba, los genotipos superiores presentaron mayores tasas de crecimiento absoluto para todas las variables, sin embargo, las tasas relativas de producción son mayores en los genotipos inferiores (Cuadros 4 y 5). Con relación a la fenología, se observa que los genotipos superiores empezaron su crecimiento un día antes que los inferiores (Cuadro 5).

Cuadro 4. Medias de las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y las tasas relativas de producción (TRP) de la altura total (ALT), el diámetro al cuello de la raíz (DCR), el índice de biomasa (IB) y el diámetro a la altura de pecho (DAP) por tratamiento, grupo genético y su combinación.

Tratamiento (Trat)	TCA ALT	TRP ALT	TCA DCR	TRP DCR	TCA IB	TRP IB
Tratamiento 1	155	0.48	3.8	0.45	38.61	1.38
Tratamiento 2	154	0.51	3.9	0.48	36.45	1.47
Tratamiento 3	157	0.49	4.2	0.48	43.77	1.44
Tratamiento 4	157	0.51	4.0	0.47	36.83	1.45
Grupo Genético (GG)						
Inferior	154	0.52	3.9	0.49	34.96	1.49
Superior	158	0.47	4.1	0.45	42.86	1.38
Combinación (GG x Trat)						
GG Inferior x Trat 1	151	0.49	3.8	0.45	37.08	1.39
GG Superior x Trat 1	159	0.48	3.9	0.45	40.14	1.37
GG Inferior x Trat 2	153	0.53	3.9	0.50	33.64	1.52
GG Superior x Trat 2	155	0.50	4.0	0.46	39.25	1.42
GG Inferior x Trat 3	159	0.54	4.2	0.53	38.09	1.59
GG Superior x Trat 3	155	0.43	4.2	0.43	49.44	1.29
GG Inferior x Trat 4	153	0.52	3.7	0.48	31.04	1.47
GG Superior x Trat 4	161	0.49	4.2	0.47	42.62	1.43

Cuadro 5. Medias de las tasas de crecimiento absoluto (TCA) y las tasas relativas de producción (TRP) del diámetro a la altura de pecho (DAP), el número de verticilos (VERT), la masa de 100 acículas (MASA_100), el inicio (YEMA_IN) y cese de crecimiento (YEMA_F) por tratamiento, grupo genético y su combinación.

Tratamiento (Trat)	TCA DAP	TRP DAP	TCA VERT	TRP VERT	MASA 100	YEMA IN	YEMA F
Tratamiento 1	2.8	0.72	4.7	0.48	2.77	43.0	312.6
Tratamiento 2	2.9	0.86	4.2	0.46	2.87	42.4	316.9
Tratamiento 3	3.1	0.71	4.2	0.46	2.91	42.6	308.6
Tratamiento 4	3.1	0.84	4.4	0.47	2.80	42.4	313.0
Grupo Genético (GG)							
Inferior	2.9	0.81	4.2	0.47	2.80	43.2	312.1
Superior	3.1	0.76	4.6	0.47	2.87	42.0	313.4
Combinación (GG x Trat)							
GG Inferior x Trat 1	2.7	0.70	4.4	0.48	2.81	43.0	312.7
GG Superior x Trat 1	2.9	0.74	5.0	0.49	2.73	43.1	312.4
GG Inferior x Trat 2	2.9	0.91	4.0	0.46	2.88	43.1	315.8
GG Superior x Trat 2	2.9	0.81	4.4	0.45	2.85	41.7	318.0
GG Inferior x Trat 3	2.8	0.72	4.1	0.47	2.77	43.3	308.4
GG Superior x Trat 3	3.3	0.71	4.3	0.45	3.05	42.0	308.8
GG Inferior x Trat 4	3.1	0.89	4.1	0.47	2.75	43.4	311.6
GG Superior x Trat 4	3.2	0.79	4.6	0.48	2.84	41.4	314.4

La tasa relativa de producción del índice de biomasa, además de las diferencias significativas a nivel de grupo genético ($p \leq 0.01$) (Cuadro 3), también presentó diferencias estadísticas para el Tratamiento 1 vs. Tratamiento 3, dentro del grupo genético inferior, siendo el segundo el que obtuvo un mayor valor ($p=0.04$), y también para la comparación entre el grupo genético inferior y superior, dentro del Tratamiento 3, en donde el inferior respondió mejor ($p \leq 0.0001$) (Figura 11) (Cuadro 3). Para el caso de su tasa de crecimiento absoluto, aquellas combinaciones que fueron diferentes correspondieron a las comparaciones entre grupos genotípicos dentro de los Tratamientos 3 y 4 ($p \leq 0.05$), siendo el grupo inferior el que presentó los menores valores de crecimiento en esta variable. Esto repercutió para que existieran diferencias estadísticamente significativas en el modelo, a nivel de grupo genético, siendo el superior el de mejor desempeño ($p \leq 0.05$) (Figura 12) (Cuadro 3).

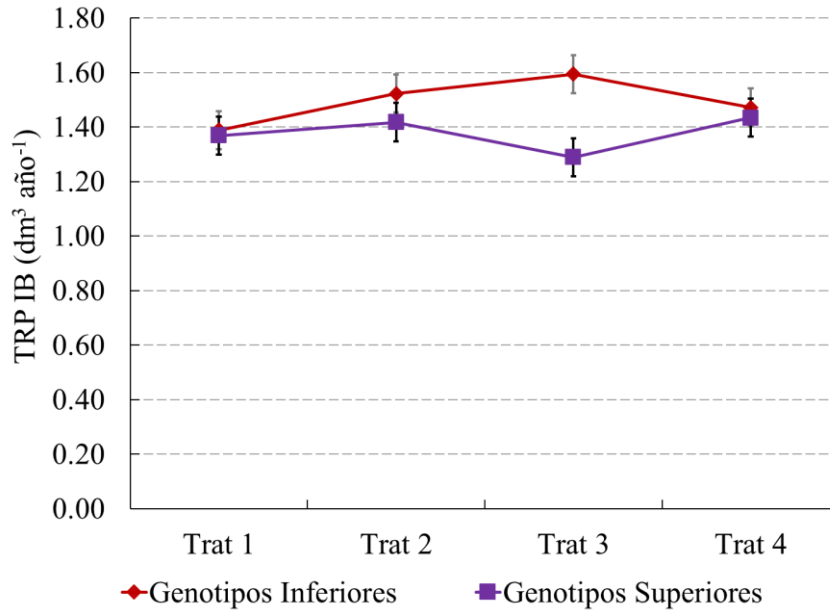


Figura 11. Comparación de medias obtenidas de la tasa relativa de producción (TRP) en índice de biomasa (IB), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

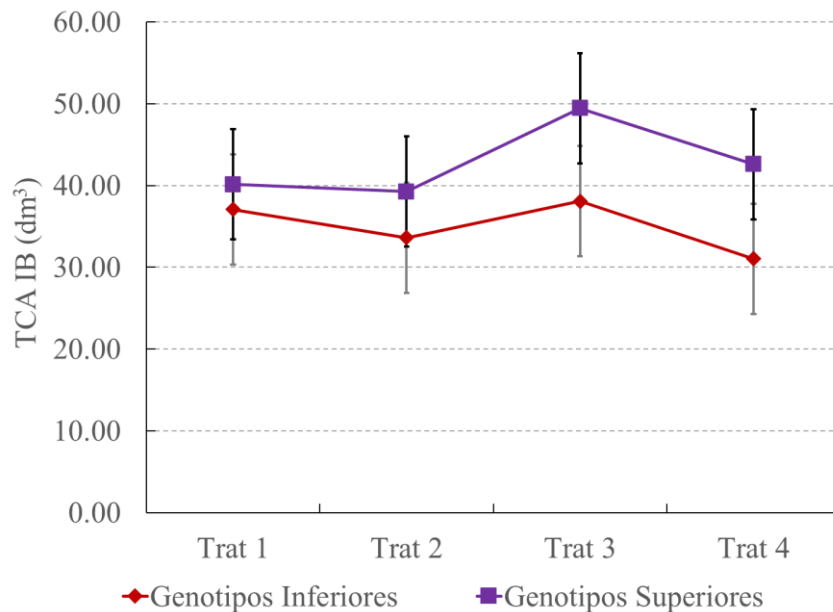


Figura 12. Comparación de medias obtenidas de la tasa de crecimiento absoluto (TCA) en índice de biomasa (IB), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

La comparación entre grupos genotípicos dentro del Tratamiento 3 también fue estadísticamente diferente para la tasa relativa de producción de la altura total ($p \leq 0.001$), siendo de mayor valor los genotipos inferiores. Por su parte, otros cotejos con una significancia menor ($p \leq 0.10$), correspondieron al Tratamiento 1 vs. el Tratamiento 3 dentro del grupo genotípico inferior ($p \leq 0.09$), donde el segundo resultó tuvo un mayor valor, y la comparación entre el Tratamiento 2 vs. 3 y el Tratamiento 3 vs. 4, dentro del grupo genotípico superior ($p \leq 0.06$ y $p \leq 0.09$, respectivamente), donde el Tratamiento 3 fue el menos favorecido. Todo esto generó la diferencia estadística entre grupos genotípicos ($p \leq 0.02$) (Figura 13) (Cuadro 3).

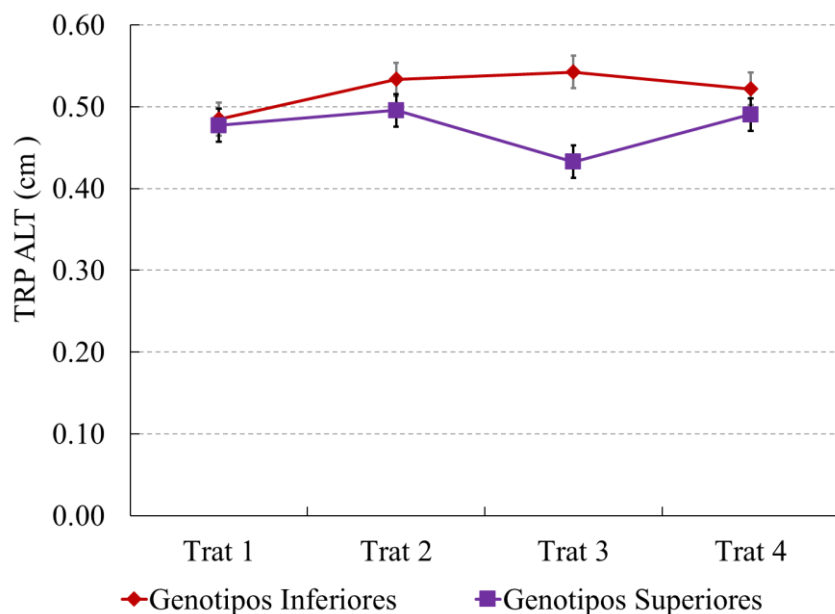


Figura 13. Comparación de medias de la tasa relativa de producción (TRP) en altura total (ALT), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

La misma comparación del Tratamiento 3 entre grupos genotípicos fue estadísticamente significativa para la tasa relativa de producción del diámetro al cuello de la raíz ($p \leq 0.0001$), en donde los genotipos inferiores fueron favorecidos. La aplicación del fertilizante de liberación controlada tuvo un mayor valor para esta variable y, al ser comparado con el tratamiento control, se encontraron diferencias significativas con $p=0.052$. El grupo genotípico inferior también resultó más favorecido en esta variable que el grupo genotípico superior ($p \leq 0.05$) (Figura 14) (Cuadro 3).

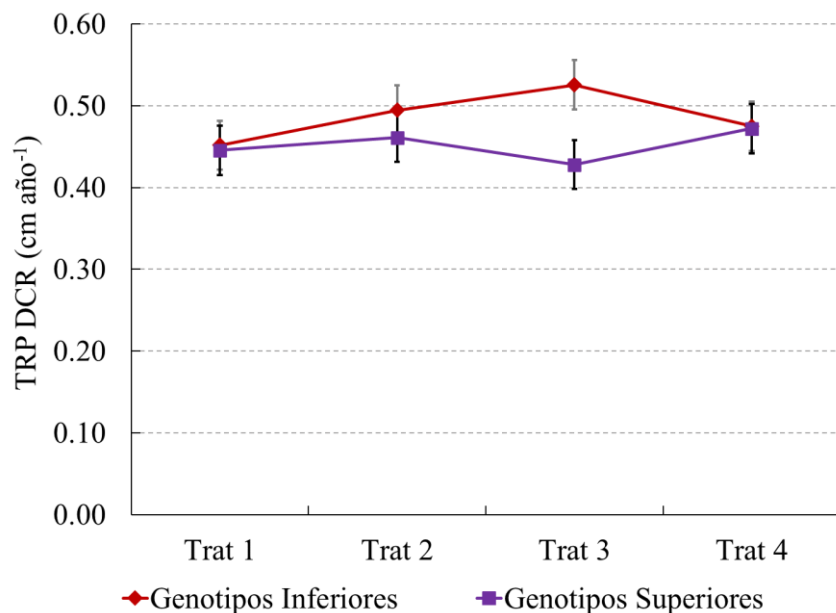


Figura 14. Comparación de medias obtenidas de la tasa relativa de producción (TRP) en diámetro al cuello de la raíz (DCR), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

Finalmente, tanto para la tasa de crecimiento absoluto del diámetro a la altura de pecho y el día juliano de inicio del crecimiento, sólo se observaron diferencias a nivel de grupo genético con una significancia de $p \leq 0.09$. Los genotipos superiores presentaron crecimiento mayor en su tasa de crecimiento absoluto en el diámetro a la altura de pecho que los inferiores, particularmente, la comparación entre grupos genéticos dentro del tratamiento 3 presentó una diferencia estadística significativa ($p \leq 0.05$), sin embargo, esto no se reflejó en el análisis de varianza ($p = 0.51$), por lo cual no puede considerarse que estas combinaciones son diferentes entre sí (Figura 15) (Cuadro 3).

La situación anterior también sucedió en la fecha de inicio de crecimiento, en donde los genotipos superiores comenzaron su crecimiento antes, aunque presentaron mayor variación que los genotipos inferiores en esta característica. Adicionalmente, se observó una tendencia dentro del tratamiento 4 entre genotipos, en donde al parecer la fertilización apresuró la fenología, empezando 2 días antes el crecimiento ($p \leq 0.08$), sin embargo, esto tampoco se vio reflejado en el componente de las interacciones dentro del análisis de varianza para esta variable ($p \leq 0.59$) (Figura 16) (Cuadro 3).

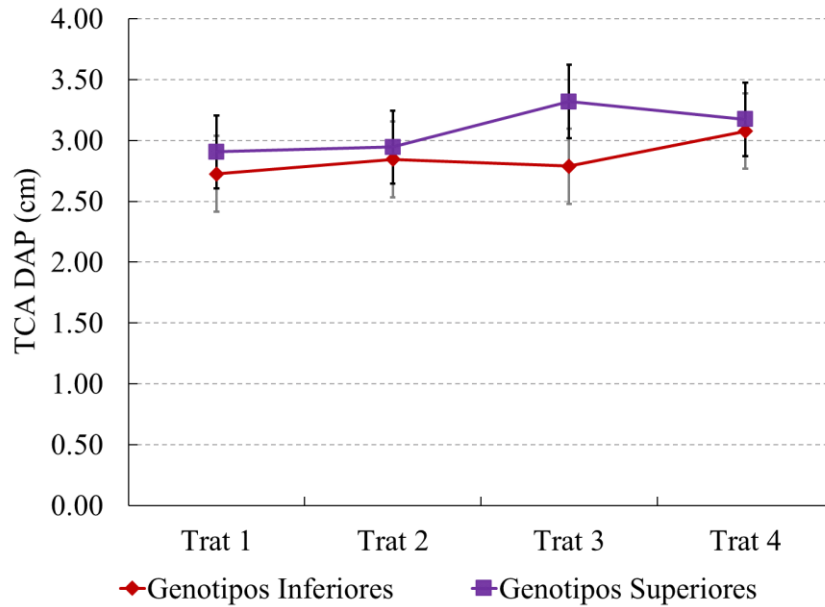


Figura 15. Comparación de las medias obtenidas para la tasa de crecimiento absoluto (TCA) del diámetro a la altura de pecho (DAP), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

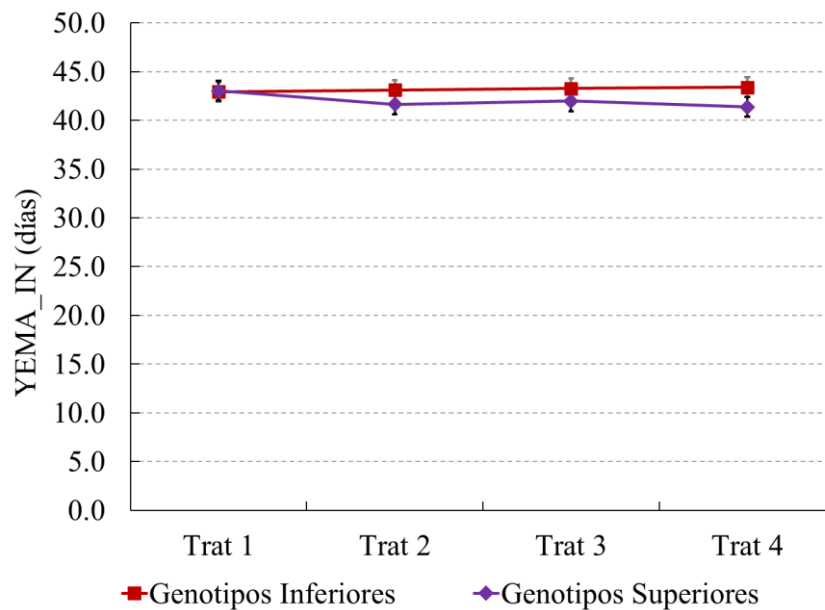


Figura 16. Comparación de medias obtenidas del día juliano de inicio de crecimiento (YEMA_IN), entre el tratamiento control (Trat 1), el tratamiento técnico (Trat 2), el tratamiento con fertilizantes de liberación controlada (Trat 3) y el tratamiento con fertilizantes agrícolas tradicionales (Trat 4) por grupo genotípico.

A nivel de familia dentro de los grupos genotípicos, se observó que tanto la tasa de crecimiento absoluto como la tasa relativa de producción en el número de verticilos es significativamente diferente entre ellas ($p \leq 0.01$). Esto también sucedió para el caso de la masa de 100 acículas, pero la significancia fue considerablemente menor ($p \leq 0.10$). Por su parte, el efecto de la interacción entre la fertilización y las familias fue sólo moderadamente significativa en el caso de la tasa de crecimiento del diámetro al cuello de la raíz ($p = 0.055$) y la tasa relativa de producción del número de verticilos ($p = 0.064$).

4.2. Discusión

Los resultados obtenidos muestran una tendencia en la que el Tratamiento 3, fertilizante de liberación controlada, provocó un mejor desempeño en crecimiento de los árboles en comparación con el tratamiento control o entre los dos grupos genotípicos.

De manera específica, los genotipos superiores tuvieron mayores valores en sus tasas de crecimiento absoluto del índice de biomasa y, en menor medida, del diámetro a la altura de pecho, mientras que los genotipos inferiores presentaron un mejor desempeño de las tasas relativas de producción de la altura total, el diámetro al cuello de la raíz y el índice de biomasa. Esto sugiere que los genotipos superiores crecen más que los inferiores pero que, para este caso, los inferiores aprovecharon mejor el fertilizante, creciendo proporcionalmente más que los superiores. Esto puede ser una razón por la cual no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, al lograr que los árboles inferiores crecieran de manera similar a los superiores, lo que contrasta con lo reportado por Carlson *et al.* (2008) para *P. taeda*.

Las medias observadas de la tasa de crecimiento absoluto de la altura total contrastan con las obtenidas por Gómez-Cárdenas *et al.* (1998) en una plantación de 4 años con *P. patula* en Texcoco, Estado de México. Estos autores registraron alturas de 108 y 66 cm en dos temporadas de crecimiento sucesivas, sin embargo, esa plantación fue establecida en un suelo somero, de textura franca, una menor precipitación media anual (562 mm en este estudio vs. 724 mm en el ensayo de progenies) y una mayor temperatura media anual (16.1 °C vs. 13.2 °C).

Salazar *et al.* (1999) registraron crecimientos anuales en altura entre 1.65 ± 0.54 cm y 2.15 ± 0.52 cm en una plantación de 18 meses compuesta por 30 procedencias de 4 especies de pino (*P. greggii*, *P. maximinoi*, *P. tecunumanii* Eguluz y J. P. Perry y *P. patula*) en Huauchinango, Pue. Los autores resaltaron el hecho de que esta especie fue la de menor crecimiento en altura, pero

generó mayor número de verticilos, en comparación con las demás especies evaluadas, probablemente por estar fuera de su rango altitudinal. A pesar de esto, los valores reportados contrastan con los obtenidos en este experimento ($4.1-5.0\pm 0.09$), muy probablemente debido a las mejores condiciones de crecimiento que se confluían en la plantación de Huauchinango (pendiente 60%, exposición Sur, temperatura y precipitación media anual de $15.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2,534\text{ m}$, respectivamente).

Otros resultados reportados por los mismos autores fueron la correlación moderadamente elevada ($r = 0.75$) entre el número de ciclos de crecimiento y el crecimiento en altura y la correlación negativa entre estas dos variables y la altitud de las procedencias ($r = -0.80$ y $r = -0.82$, respectivamente). Esto puede explicar las diferencias de crecimiento entre Chignahuapan (ensayo) y las procedencias de Zacatlán, que están a menor altitud. La procedencia Tlaxco, tiene una altitud de $2,800\text{ m}$ y presentó menor crecimiento en altura, lo que resulta particularmente importante dado que las familias utilizadas en el presente ensayo también fueron recolectadas a una altitud similar ($2,894\text{ m}$). De esta forma, es de esperarse que a pesar de que las condiciones climáticas sean favorables, la respuesta del crecimiento puede estar limitada por las adaptaciones genéticas al clima de la procedencia de la semilla que originaron los árboles que se están probando en el ensayo de progenies.

A pesar que el crecimiento en altura del árbol está determinado desde un año anterior al período del crecimiento corriente (ciclo de 2 años), en especies con un patrón de crecimiento en altura fijo-libre (por ejemplo, *P. taeda*, *P. patula* posee un patrón de crecimiento similar), los fotosintatos generados en el período actual pueden promover la elongación, particularmente de las segundas y subsecuentes yemas formadas a lo largo del año. Asimismo, las condiciones de humedad, tanto del año anterior como del año corriente, pueden afectar el patrón de crecimiento en altura en cierto grado (Kozlowski, 1964).

El diámetro a la altura de pecho registrado podría ser menor a lo esperado, si se compara con los datos de Bustillos *et al.* (2018), aunque estos últimos corresponden a individuos de 7 años (7.9 cm , rango de $0.7-14.5\text{ cm}$), mientras que la plantación experimental en estudio, contaba con 6 años de edad (5.7 , rango de $2.2-10.3\text{ cm}$), al momento de la evaluación. Esta situación también sucede con la altura total, donde los autores registraron valores de 5.7 m , rango de $1.4-9.4$, vs. 4.04 m , rango de $1.9-6.0\text{ m}$, obtenidos en el presente experimento.

El crecimiento en diámetro puede ser promovido por la formación de hormonas de crecimiento en las yemas apicales y, además, depende de la temperatura estacional y la disponibilidad de agua pudiéndose mantener a lo largo de toda la estación de crecimiento hasta su cese, posiblemente regulado por el fotoperíodo. Sin embargo, aunque se considera que este puede detenerse cuando la humedad del suelo corresponda al 40% del agua aprovechable, su cese está más relacionado con la velocidad o tasa de aprovechamiento de esa agua disponible del suelo (Dougherty *et al.*, 1994). Es de notar también que el agua disponible está fuertemente relacionada con la porosidad del suelo que, a su vez, depende de la textura (Hacke *et al.*, 2000).

Los resultados del presente experimento contrastan con los encontrados por Haase *et al.* (2006) en *Pseudotsuga menziesii*, quienes utilizaron fertilizantes de liberación controlada a dosis de 7, 13 y 18 g plántula⁻¹ como complemento a la dosis convencional de fertilización utilizada en vivero para la especie, la cual es ajustada según las fases de crecimiento de la plántula. Al ser plantadas y evaluadas las plántulas en campo, los autores encontraron crecimientos diferenciados en altura, diámetro y volumen hasta 3 años después y en biomasa de 100 acículas durante los 2 primeros años. El uso de los dos tipos de fertilizantes en su conjunto generó mejores respuestas que cuando sólo se trataron las plantas con fertilización habitual.

El uso conjunto de los fertilizantes agrícolas y de liberación controlada, concuerda con lo reportado por Reyes-Millalón *et al.* (2012) en *P. radiata*, 4 años después de aplicados los tratamientos. Estos autores demostraron la eficiencia de los fertilizantes de liberación controlada en el crecimiento de la especie, ya fuera de forma conjunta con fertilizantes agrícolas o de forma individual. Por su parte, Vázquez *et al.* (2018) observaron diferencias en altura, diámetro y volumen, en *Pinus greggii* var. *greggii* un año después de su establecimiento, cuando aplicaron fertilizantes a dosis de 7 y 14 g plántula⁻¹. Los autores utilizaron fertilizantes de liberación lenta que, en algunos casos, no difirieron en su respuesta en comparación a los fertilizantes agrícolas.

La eficacia de los fertilizantes también puede observarse en condiciones de campo en especies de angiospermas tratadas con dosis mayores de 30 g por plántula durante los primeros 2 años de plantados (Jacobs *et al.*, 2005).

Por otro lado, los resultados obtenidos en el presente experimento también concuerdan con los de Vázquez *et al.* (2015) que trabajaron en plantaciones de *P. patula* de 13 y 15 años de edad. Aunque en este caso, el crecimiento parecía estar más limitado por la cantidad de luz que por los

nutrimentos, lo que se intuyó por la respuesta que tuvo a los aclareos aplicados. Así también sucede con los datos obtenidos por Štofko (2010). Este autor observó una respuesta significativa en el diámetro y la altura de *Picea abies* (L.) H. Karst hasta 3 años después de aplicados los fertilizantes de liberación controlada a dosis de 50 g plántula⁻¹. Sin embargo, para *Larix decidua* Mill., sí encontraron diferencias significativas en la altura desde el primer año después su aplicación, aunque esto no sucedió para el diámetro.

Las conclusiones de los trabajos arriba citados permiten señalar la posibilidad de disminuir los costos de producción y mantenimiento cuando se usan fertilizantes de liberación controlada, tanto en vivero como en campo, pues se ocupa una menor cantidad de fertilizante y se mantienen buenas o mayores tasas de crecimiento, así como similar o mejor estado nutricional de las plántulas, cuando se comparan con tratamientos que usan productos agrícolas convencionales (Reyes-Millalón *et al.*, 2012; Bautista *et al.*, 2018; González *et al.*, 2018; Vázquez *et al.*, 2018).

Un factor que pudo influir en la respuesta en crecimiento es la condición climática diferenciada entre el sitio de recolecta de la semilla y el lugar donde se estableció el ensayo de progenies.

La diferencia entre la elevación (2,894 vs. 2,555 m), la temperatura media anual (12.0 °C vs. 13.2 °C), la precipitación media anual (795 vs. 724 mm), la precipitación durante la temporada de crecimiento (644 vs. 574 mm), los grados día (2561 vs. 2980) y el índice de aridez (0.064 vs. 0.075) pueden servir como indicadores para entender el comportamiento de las familias con relación al crecimiento (Anexo 3) (García y Sierra, 2016; Virginia Tech y USDA Forest Service, 2020). Es posible que todos estos factores climáticos hayan influido, tanto para que el fertilizante fuera absorbido, como para que el árbol pudiera asimilarlo y esto se reflejara en el crecimiento de los individuos tratados, debido a la menor disponibilidad de agua y la consecuente reducción en la actividad fotosintética.

La fotosíntesis depende de la luz, CO₂, agua y de enzimas fotosintéticas (v. gr. RUBISCO). Contar con un suministro adecuado de agua resulta primordial para aumentar la productividad debido a que bajo estrés hídrico ocurre el cierre estomatal, lo que reduce la fijación CO₂ por unidad de luz interceptada (Binkley *et al.*, 2004). Los individuos en el ensayo se encuentran bajo niveles de humedad inferiores en comparación con la zona de recolecta de la semilla.

Binkley et al. (2004) mencionan que el suministro de un recurso limitante debe mejorar la eficiencia de uso de otros recursos, por lo que la respuesta a la fertilización está supeditada al adecuado abastecimiento de agua.

Allen y Albaugh (1999), en una plantación de *P. taeda* de 8 años, encontraron que la irrigación (mantener la humedad disponible al 40%) sólo fue diferente al control en el volumen en 2 años secos y en ningún caso fue mejor que la fertilización (mantener N foliar por encima de 1.3%) o su combinación, los cuales aumentaron el área foliar y el volumen durante 6 años. Además, se determinó la existencia de un efecto aditivo entre la irrigación y la fertilización para la eficiencia de crecimiento del fuste.

Allen et al. (2005), en una plantación de seis años, encontraron respuestas positivas a la irrigación con respecto al control para el diámetro, la altura, la biomasa de fuste y el crecimiento en biomasa promedio a nivel rodal en *L. styraciflua*, *Platanus occidentalis* L. y la altura de *P. elliotii*. La combinación con la fertilización (12-4-8, ajustando a 85 de N ha⁻¹ año⁻¹ más micronutrientes) logró que se encontraran diferencias adicionales en la altura de *P. taeda*, la biomasa de fuste de *P. elliotii* y su crecimiento en biomasa. Los autores mencionan que las diferencias encontradas entre angiospermas y gimnospermas se pueden atribuir a que estas últimas se encuentran menos limitadas por la sequía, al poseer menor conductancia estomatal, menor conductividad hidráulica y alta eficiencia en el uso del agua.

Tomando en consideración lo anterior y los datos encontrados por Salazar *et al.* (1999), es posible pensar que el componente genético puede restringir la capacidad productiva de los individuos y esto está dado por su procedencia, en ese sentido, las condiciones ambientales más benignas puede que no se traduzcan en mejores crecimientos debido a su predisposición genética derivada de la adaptación a las condiciones climáticas locales. Un ejemplo de esto fue lo observado por estos autores en el desempeño de los individuos procedentes de Tlaxco (condiciones climáticas más restrictivas) que sólo crecieron 1.65 ± 0.54 m en altura y produjeron 5.08 ± 1.61 ciclos de crecimiento, en promedio en un año, al plantarse en Huauchinango (mejores condiciones ambientales). Esto concuerda moderadamente con los resultados obtenidos para esa variable en el ensayo de progenies que se evaluó.

La temperatura influye en la tasa de transpiración de las plantas (Allen *et al.*, 2006), así que, a pesar de que la diferencia entre la zona de recolecta y el ensayo de progenies es pequeña, puede

causar estrés hídrico en los árboles. Esto, aunado a una menor precipitación tanto en escala anual como en la temporada de crecimiento y su relación con el índice de aridez, podría resultar en menores tasas de crecimiento (Anexo 3).

La disponibilidad de agua también tiene relación con la efectividad de los fertilizantes debido al mecanismo de absorción. La gran mayoría de los nutrimentos son absorbidos por flujo de masas, (excepto P y K, que lo hacen por difusión) y a pesar de que algunos de los productos utilizados son líquidos y los sólidos fueron aplicados diluidos en agua, no es lo suficiente para provocar una respuesta positiva. Se sabe que los fertilizantes agrícolas requieren agua para disolverse y pasar a la solución de suelo (Alcántar y Trejo-Téllez, 2013). Por su parte, el fertilizante de liberación controlada [Multicote Agri (8) ®] también depende del agua para disolver los nutrimentos dentro de la capa de polímero que los recubre. Sin embargo, la temperatura es la variable que controla la liberación de nutrimentos por difusión hacia la zona radical, lo que le confiere una ventaja con respecto a los fertilizantes tradicionales (Du *et al.*, 2006; Haifa Group, 2014).

Minchin y Lacoite (2005) reportaron que el modelo de priorización del uso de carbohidratos más aceptado, presumiblemente tanto para gimnospermas como angiospermas (Desalme *et al.*, 2017), da prioridad al desarrollo de yemas y hojas, al cambium, a las raíces, y almacenamiento, en ese orden. La fertilización tiene un efecto en la redistribución de los carbohidratos dentro de la planta, generalmente, incrementando la relación yema/raíces y la biomasa aérea, lo que explica, parcialmente, el aumento de la productividad, ya sea por la menor translocación de nutrimentos a las raíces, por la existencia de un mayor sistema fotosintético, en ocasiones, más eficiente en el uso de la luz solar (Cannell, 1985; Fox *et al.*, 2007a; Landsberg y Sands, 2011) o por cambios en la arquitectura hidráulica del árbol, que además, pueden estar influenciados por su calidad genética (Ewers *et al.*, 2000; Faustino *et al.*, 2013; Ward *et al.*, 2015).

Por lo anterior, al no encontrar diferencias significativas a nivel de la masa de 100 acículas ni por la fertilización o la condición genética, cabe la posibilidad de que las demás variables tampoco las presentaran. Esto contrasta con otros experimentos con fertilizantes agrícolas y con fertilizantes de liberación controlada, en los que encontraron diferencias en la biomasa de acículas después del primer año de aplicados los tratamientos (Haase *et al.*, 2006; Lázaro *et al.*, 2012).

De manera general, el área donde fue establecido el experimento, presenta las características descritas por Vela (1980), ya que cuenta con humedad gravimétrica suficiente (23.4 a 28.7%, a

capacidad de campo y punto de marchitez permanente, respectivamente, utilizando muestras tamizadas) y el pH es adecuado (5.45). Con relación a la condición nutrimental, se considera que la concentración de N ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+ = 68$ ppm), Fe (21 ppm), y Mn (35 ppm) son adecuados, el Ca (8.1 meq/100 g) y Zn (0.7 ppm) se encuentran en cantidades suficientes, mientras que el P-Bray (14.5 ppm), Mg (1.03 meq/100 g), K (0.26 meq/100 g) y Cu (0.9 ppm) son deficientes (Anexo 2) (SEMARNAT, 2002), lo que no concuerda con los datos obtenidos en los análisis foliares (Anexo 1). Se ha considerado que, los análisis de suelo no siempre reflejan las necesidades nutrimentales de los árboles (Alvarado, 2016).

Por otro lado, la densidad aparente (1.19 g/cm^3), la escasa cantidad de materia orgánica (2.45%) y la textura (arcillosa) del suelo del ensayo de progenies utilizado podrían ser características limitantes que afecten el crecimiento de las familias probadas (Vela, 1980).

Las concentraciones nutrimentales foliares (Anexo 1) caen dentro del rango de valores normales obtenidos por Louw y Scholes (2003) para muestras foliares tomadas en la época de crecimiento, con excepción del Ca y el Mn, y el Fe que se encuentran en los límites inferiores. Esto es consistente con la comparación realizada en base a las concentraciones críticas reportadas por Sánchez *et al.* (2018) para *P. patula*, determinadas a partir de muestras foliares de árboles en dormancia, para detectar la deficiencia de estos nutrimentos (más Zn) y que los autores corroboraron al subsanar la deficiencia de K en una plantación de esta especie en Aquixtla, Pue., lo que generó respuestas positivas del diámetro y la masa de 100 acículas.

Algo que se debe tener en consideración es la capacidad de las plantas para adaptarse a las deficiencias nutrimentales. Las plantas pueden modificar su sistema de absorción para aumentar la adquisición de un nutrimento deficiente, induciendo un sistema de absorción específico con alta afinidad por ese nutrimento y limitando la absorción de otros. Al corregirse la deficiencia, la absorción de los demás nutrimentos no deficientes vuelve a la normalidad (Landsberg and Sands, 2011). En este sentido, se requiere una concentración mínima de cada nutrimento antes de que pueda ocurrir el crecimiento, y cuando todos los nutrimentos limitan el crecimiento simultáneamente la tasa relativa de crecimiento estará determinada por las concentraciones internas de todos los nutrimentos (Knecht y Göransson, 2004). Por tanto, la utilización de fertilizantes de liberación controlada parece ser ventajosa para garantizar que se mantenga, lo mejor posible, estas relaciones entre los nutrimentos.

La fecha de inicio del crecimiento se adelantó, ligeramente, por los tratamientos de fertilización, de manera similar a los resultados obtenidos por Fløistad (2002) y Pan *et al.*, (2017) en brinzales de *Picea abies* y *Pinus tabulaeformis* Carrière (escrito en el artículo como *P. tabulaeformis*), respectivamente, aunque como sucedió en estas investigaciones el efecto generado no fue estadísticamente significativo.

La condición genética resultó ser la que generó un inicio del crecimiento más rápido, siendo significativa con $p=0.09$. Tal circunstancia puede tener relación con el hecho de que las familias utilizadas en el establecimiento del ensayo son de una misma región y están adaptadas a las condiciones de fotoperíodo y temperatura, las cuáles son las variables que influyen más en esta característica. Cooke *et al.* (2012) comentan sobre la existencia de variaciones en poblaciones naturales, a lo largo de clinas latitudinales o altitudinales, para las características relacionadas con la fenología de las yemas, lo que implica la existencia de una interacción GxA. Esto puede observarse en el caso de la adaptación local en genotipos de mayores altitudes (menor temperatura) que entrarán en dormancia antes que los genotipos de menores altitudes (mayor temperatura).

Tanto la genética como las condiciones ambientales (temperatura y fotoperíodo, principalmente, aunque también la disponibilidad de nutrientes y agua) juegan un papel importante para determinar tanto el inicio como el cese del crecimiento (Kozłowski, 1964; Dougherty *et al.*, 1994; Cooke *et al.*, 2012).

En el caso del género *Pinus* estos procesos están regulados por mecanismos autónomos endógenos que son dependientes de la especie, la raza geográfica, la edad y el tipo de yema, los cuáles, se ha demostrado, poseen un control genético heredable tanto para el rompimiento, la dormancia de las yemas y los requerimientos de frío para su inducción (Kozłowski, 1964; Cooke *et al.*, 2012).

Por su parte, Gómez-Cárdenas *et al.* (1998) reportaron períodos de crecimiento de más de 300 días, lo que es relativamente consistente con los resultados obtenidos en el presente experimento, en donde se tienen registro de 61 árboles que cesaron su crecimiento entre los 269–275 días (promedio 270) y 179 árboles que continuaban creciendo hasta la última salida realizada a campo el 14 de noviembre de 2019. Dada la diferencia de altitudes y latitudes (2,416 m [estimada] y 2,555 m, 19° 29' y 19° 57', para la plantación analizada por los autores y el ensayo de progenies, respectivamente), se consideraría que la temporada de crecimiento debería ser menor

en este experimento. Sin embargo, la ocurrencia de lluvias en el mes de noviembre de 2019, puede haber sido la causa por la cual se mantuvo activa la yema apical en el caso de la presente investigación. Kozlowski (1964) menciona que la fecha de cese de crecimiento puede verse afectada tanto por una mayor disponibilidad de agua como de nutrimentos (fertilización), sin embargo, este hecho no se pudo determinar con exactitud en el presente trabajo.

Por otro lado, el número de verticilos parece ser consistente en la especie. En el presente trabajo se observó un rango de entre 4.1-5.0±0.09 verticilos en un año de crecimiento, lo que concuerda con lo reportado por Gómez-Cárdenas *et al.* (1998) de 4 (±1) ciclos de crecimiento (rango de 2 a 6), pero difiere de los datos obtenidos por Salazar *et al.* (1999) de 5.08±1.61 a 6.38±1.13 ciclos de crecimiento en el ensayo de baja elevación, donde resaltan dos procedencias más sureñas que las utilizadas en este estudio [Zacatlán (Norte), Pue. y Zacatlán, Pue.] que presentan valores de 5.77±1.32 y 5.51±1.50 verticilos, respectivamente.

Los datos obtenidos por Salaya *et al.* (2012) y Bustillos *et al.* (2018), en dos plantaciones en Puebla, indican un control genético bajo a moderado [heredabilidades individuales (h_i^2) y de familias (h_r^2) para el diámetro ($h_i^2 = 0.00-0.35$ y $h_r^2 = 0.00-0.30$), la altura ($h_i^2 = 0.00-0.37$ y $h_r^2 = 0.00-0.31$), el volumen ($h_i^2 = 0.04 - 0.53$ y $h_r^2 = 0.07-0.39$) y el número de verticilos a 2.5 m de altura ($h_i^2 = 0.09$ y $h_r^2 = 0.22$), para familias de *P. patula* nativas de edades entre 5 y 7 años. Estos resultados indican que la variación ambiental tiene gran impacto en el desempeño de los genotipos (interacción GxA), al grado que Salaya *et al.* (2012) encontraron la pérdida completa del control genético al analizar los datos conjuntamente en los dos sitios que evaluaron.

Particularmente, la fertilización puede generar este tipo de interacciones, sin embargo, esto puede permitir diferenciar familias que tengan respuestas positivas, nulas o negativas o genotipos tolerantes que puedan ser utilizados en suelos pobres (Zobel y Talbert, 1984), así como promover una condición más homogénea, en términos nutricionales, que permita una mejor estimación de los parámetros genéticos (López-Upton *et al.*, 1999).

Algunos autores han encontrado respuestas diferenciadas a nivel de familia para las aplicaciones de N y P (Li *et al.*, 1991; Zhang *et al.*, 2013), mientras que, la evaluación realizada con 40 clones de *P. radiata* en 14 sitios contrastantes de Nueva Zelanda, demostró la existencia de correlaciones negativas significativas con el crecimiento con relación a la temperatura media anual (-0.125, a edades de 1 año en el diámetro al cuello de la raíz y la altura y -0.151, a 3 años en

diámetro), el N (-0.113, diámetro a los 6 años) y el P en el suelo (-0.087 y -0.118 en altura total a 1 y 6 años). Adicionalmente, se observó que existían correlaciones positivas entre el $\delta^{13}\text{C}$ (indicador de uso eficiente del agua) y la altura (0.53) y con el diámetro (0.61), además de una heredabilidad moderada ($\hat{H}^2=0.21$) (Li *et al.*, 2015). Esto sugiere que los árboles más grandes tienen un mejor uso del agua.

Para el presente experimento debe considerarse que los efectos encontrados a nivel de grupo genotípico para las variables estadísticamente diferentes y con excepción de la tasa de crecimiento absoluto en diámetro al cuello de la raíz y la tasa relativa de producción en número de verticilos, se deben a una respuesta conjunta de todas las familias dentro del grupo, más que a la presencia de familias particularmente eficientes en la absorción o asimilación de los nutrimentos aplicados.

Los resultados obtenidos en este experimento también contrastan con lo encontrado por Zas *et al.* (2006) quienes evaluaron el efecto de la fertilización en *P. radiata* en Galicia, España. Utilizaron plántulas de 27 familias de polinización libre de 1 año de edad que fueron plantadas en tres sitios diferentes, en los que se evaluaron 9 tratamientos de fertilización diferentes N, P-Ca, K y Mg en dosis de 5, 10, 15 y 5 g planta⁻¹, respectivamente.

Entre sus resultados encontraron que los tratamientos de fertilización tuvieron un efecto significativo en la altura en comparación con el tratamiento control. Además, lograron identificar que el P y, en menor medida el Mg, fueron los nutrimentos que limitaban más el crecimiento en la especie.

Por otra parte, también se encontró que, para uno de los sitios, algunas familias demostraron mayor eficiencia en el uso de los nutrimentos (interacción Familias x Fertilización), sin embargo, al analizar los tres sitios en su conjunto, la interacción no era significativa, lo que podría estar explicado por las diferencias en las condiciones edáficas de cada sitio, antes de la fertilización.

Tomando como base los resultados de Zas *et al.* (2006), resulta importante resaltar que es necesario evaluar el desempeño de los genotipos en varios sitios experimentales y con varias dosis de fertilización, de esta forma, se podrían separar los genotipos adecuados para cada ambiente o para todos los ambientes, basándose en las interacciones entre el sitio de plantación, la fertilización y los genotipos, además de la posibilidad de identificar los nutrimentos que podrían estar limitando el crecimiento de la especie de interés.

Martins *et al.* (2009) evaluaron la respuesta a la fertilización de 28 familias de polinización libre de *Pinus pinaster* Aiton. de calidad superior en el Noreste de España. El establecimiento del experimento fue similar al realizado por Zas *et al.* (2006); mismos tratamientos, dosis y tres sitios experimentales. Se determinó que existieron diferencias significativas para la altura en los 5 años que se evaluaron las plantaciones.

La aplicación de N generó respuestas negativas en el crecimiento en los tres sitios (significativas sólo en dos) mientras que la aplicación de Mg generó respuestas positivas en todos los sitios, pero sólo en el sitio más seco (A) fue estadísticamente significativa. Los otros nutrimentos adicionados (P-Ca y K) fueron tanto positivos como negativos en los tres sitios evaluados.

Estos resultados concordaron con los análisis foliares realizados al inicio del experimento, en donde se observó la deficiencia de Mg, P, K y Ca, en ese orden, aunque uno de los sitios respondió negativamente a la aplicación P-Ca, presumiblemente debido al ataque de insectos patógenos [*Hylobius abietis* (C. Linnaeus)] que redujeron el crecimiento en los 2 primeros años de la plantación.

Se encontró también que hubo interacciones entre la familia y el tratamiento de fertilización, así como el sitio x familia x tratamiento, lo que indicó la existencia de un control genético de la respuesta fenotípica derivada de la modificación de la disponibilidad nutrimental, la cual es diferente para cada familia pero que también está sujeta a los efectos de la interacción genotipo x ambiente.

Aunque en el presente experimento los genotipos inferiores respondieron mejor a la aplicación de fertilizantes, los genotipos superiores tuvieron mayor crecimiento en términos absolutos, esto resulta importante a considerar para que puedan identificarse aquellos que puedan capitalizar la mayor disponibilidad nutrimental para promover su crecimiento, de forma que estos sean la primera opción de utilización al momento de establecer plantaciones forestales comerciales.

5. CONCLUSIONES

Las dosis de fertilización probadas no generaron respuestas estadísticamente significativas en las variables consideradas un año después en las familias de *Pinus patula* evaluadas. No obstante, los grupos genotípicos sí fueron significativamente diferentes para algunas variables.

El grupo genético superior tuvo mayores valores en las tasas de crecimiento absoluto en el índice de biomasa y el diámetro a la altura de pecho, sin embargo, el grupo inferior presentó mayores tasas de producción relativa para estas variables y la altura total, lo que puede indicar una mejor utilización de los fertilizantes aplicados.

La interacción entre el genotipo y los tratamientos de fertilización fue significativa sólo para las tasas de crecimiento relativo en índice de biomasa, diámetro al cuello de la raíz y la altura total, en donde los genotipos inferiores que recibieron el fertilizante de liberación controlada presentaron un mayor valor en comparación con el tratamiento control.

Se demostró que los fertilizantes de liberación controlada pueden generar diferencias en el crecimiento, a diferencia de los fertilizantes agrícolas tradicionales que no fueron estadísticamente diferentes al control. Sin embargo, esto sólo fue posible observarlo en conjunto con el efecto de la calidad genética de los individuos tratados, siendo los genotipos inferiores los que respondieron al uso de fertilizantes de liberación controlada.

A un año de aplicados los fertilizantes, los tratamientos considerados no afectaron el inicio del crecimiento en *Pinus patula*, sin embargo, la calidad genética sí, como se observó en los genotipos superiores que empezaron a crecer, en promedio, un día antes que los genotipos inferiores.

El uso de fertilizantes de liberación controlada parece ser una opción adecuada para promover el crecimiento de plantaciones jóvenes en campo, siempre y cuando se aplique una dosis adecuada y existan las condiciones ambientales que permitan la mejor utilización del fertilizante y el continuo crecimiento de los individuos tratados.

6. LITERATURA CITADA

- Aguilera R., M., A. Aldrete, T. Martínez T. y V. M. Ordaz C. 2016a. Producción de *Pinus montezumae* Lamb. con diferentes sustratos y fertilizantes de liberación controlada. *Agrociencia* 50(1):107–118.
- Aguilera R., M., A. Aldrete, M. T. y V. M. Ordaz C. 2016b. Producción de *Pinus pseudostrobus* Lindl. con sustratos de aserrín y fertilizantes de liberación controlada. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(34):007–019. doi: 10.29298/rmcf.v7i34.79
- Albaugh, T. J., H. L. Allen and T. R. Fox. 2007. Historical patterns of forest fertilization in the southeastern United States from 1969 to 2004. *Society of American Foresters* 31(3):129–137. doi: 10.1093/sjaf/31.3.129
- Albaugh, T. J., T. R. Fox, R. A. Rubilar, R. L. Cook, R. L. Amateis and H. E. Burkhart. 2017. Post-thinning density and fertilization affect *Pinus taeda* stand and individual tree growth. *Forest Ecology and Management* 396:207–216. doi: 10.1016/j.foreco.2017.04.030
- Albaugh, T. J., R. Rubilar, J. Alvarez and H. L. Allen. 2004. Radiata pine response to tillage, fertilization, and weed control in Chile. *Bosque* 25(2):5–15. doi: 10.4067/s0717-92002004000200002
- Albaugh, T. J., J. L. Stape, T. R. Fox, R. A. Rubilar and H. L. Allen. 2012. Midrotation vegetation control and fertilization response in *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* across the southeastern United States. *Southern Journal of Applied Forestry* 36(1):44–53. doi: 10.5849/sjaf.10-042
- Alcántar G., G. y L. I. Trejo-Téllez (coords.). 2013. *Nutrición de Cultivos*. Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 454 p.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. *Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal: Guía de Muestreo, Preparación, Análisis e Interpretación*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 156 p.
- Ali, S. and F. Danafar. 2015. Controlled-Release Fertilizers: Advances and Challenges. *Life Science Journal* 12(11):33–45.
- Allen, C. B., R. E. Will and M. A. Jacobson. 2005. Production efficiency and radiation use efficiency of four tree species receiving irrigation and fertilization. *Forest Science* 51(6):556–569. doi: 10.1093/forestscience/51.6.556
- Allen, H. L. and T. J. Albaugh. 1999. Ecophysiological basis for plantation production: A loblolly pine case study. *Bosque* 20(1):3–8.

- Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del Cultivo. Guías para la Determinación de Agua de los Cultivos. Estudio FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 299 p.
- Alvarado, A. 2016. Plant Nutrition in Tropical Forestry. *In*: Pancel, L. and M. Köhl (eds). Tropical Forestry Handbook. 2nd ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Berlin, Germany. pp: 1114–1202.
- Alvarado, A., J. Raigosa y J. Oviedo. 2006. Nutrición y fertilización del pino caribeño (*Pinus caribaea*). *Informaciones Agronómicas* 62:8–12.
- Álvarez, J., J. Rodríguez y D. Suárez. 1999. Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, a través de un método racional de fertilización. *Bosque* 20(1):23–36.
- Amponsah, I. G., V. J. Lieffers, P. G. Comeau and S. M. Landhäusser. 2004. Nitrogen-15 uptake by *Pinus contorta* seedlings in relation to phenological stage and season. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(4):329–338. doi: 10.1080/02827580310019301
- Arnon, D. I. and P. R. Stout. 1939. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. *Plant Physiology* 14(2):371–375.
- Ballard, T. M. and R. E. Carter. 1986. Evaluating Forest Stand Nutrient Status. Land Management Report Number 20. BC Ministry of Forests. Information Services Branch. Victoria, Canada. 60 p.
- Barker, A. V. and D. J. Pilbeam (eds). 2007. Handbook of Plant Nutrition. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton, USA. 643 p.
- Barnes, R. D., L. J. Mullin and G. Battle. 1992a. Genetic control of fifth year traits in *Pinus patula* Schiede and Deppe. *Silvae Genetica* 41(4–5):242–248.
- Barnes, R. D., L. J. Mullin and G. Battle. 1992b. Genetic control of eighth year traits in *Pinus patula* Schiede and Deppe. *Silvae Genetica* 41(6):318–326.
- Barnes, R. D. and M. A. Schweppenhauser. 1978. *Pinus patula* Schiede and Deppe progeny tests in Rhodesia. Genetic control of nursery traits. *Silvae Genetica* 27(5):200–204.
- Barnes, R. D. and M. A. Schweppenhauser. 1979. Genetic control of 1.5-year old traits in *Pinus patula* Schiede et Deppe and a comparison of progeny test methods. *Silvae Genetica* 28(4):156–167.

- Bartkowiak, S. M., L. J. Samuelson, M. A. McGuire and R. O. Teskey. 2015. Fertilization increases sensitivity of canopy stomatal conductance and transpiration to throughfall reduction in an 8-year-old loblolly pine plantation. *Forest Ecology and Management* 354:87–96. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.033
- Bautista O., G. I., J. Á. Prieto R., J. C. Hernández D., E. Basave V., J. R. Goche T. y E. Montiel A. 2018. Crecimiento de *Pinus greggii* Engelm. bajo diferentes rutinas de fertilización en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(49):1–21. doi: 10.29298/rmcf.v9i49.171
- Binkley, D. 1993. *Nutrición Forestal. Prácticas de Manejo*. Limusa. México, D.F. 403 p.
- Binkley, D., H. Burnham and H. Lee Allen. 1999. Water quality impacts of forest fertilization with nitrogen and phosphorus. *Forest Ecology and Management* 121(3):191–213. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00549-0
- Binkley, D., R. Carter and H. L. Allen. 1995. Nitrogen Fertilization Practices in Forestry. *In: Bacon, P. E. (ed). Nitrogen Fertilization in the Environment*. CRC Press. New York, USA. pp: 421–442.
- Binkley, D. and R. Fisher. 2013. *Ecology and Management of Forest Soils*. 4th ed. Wiley-Blackwell. Hoboken, USA. 363 p.
- Binkley, D., J. L. Stape and M. G. Ryan. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management* 193(1–2):5–16. doi: 10.1016/j.foreco.2004.01.019
- Brockley, R. 2001. *Foliar Sampling Guidelines and Nutrient Interpretative Criteria for Lodgepole Pine*. Ministry of Forests Research Program Extension Note No. 52. BC Ministry of Forests. Kalamalka Forestry Centre. Vernon, Canada. 8 p.
- Bustillos A., C. V., J. J. Vargas H., J. López U. y G. Ramírez V. 2018. Repetibilidad de parámetros genéticos de las características de ramificación en progenies de *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 24(1):1–10. doi: 10.21829/myb.2018.2411131
- Campoe, O. C., J. L. Stape, T. J. Albaugh, H. Lee Allen, T. R. Fox, R. Rubilar and D. Binkley. 2013. Fertilization and irrigation effects on tree level aboveground net primary production, light interception and light use efficiency in a loblolly pine plantation. *Forest Ecology and Management* 288:43–48. doi: 10.1016/j.foreco.2012.05.026
- Cañellas, I., L. Finat, A. Bachiller y G. Montero. 1999. Comportamiento de planta de *Pinus pinea* en vivero y campo: ensayos de técnicas de cultivo de planta, fertilización y aplicación de herbicidas. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetal* 8(2):335–359.

- Cannell, M. G. R. 1985. Dry Matter Partitioning in Tree Crops. *In*: Cannell, M. G. R. and J. E. Jackson (eds). Attributes of Trees as Crop Plants. Abbots Ripton. Institute of Terrestrial Ecology. pp: 160–193.
- Carlson, C. A. 2000. Impact of fertilization at first thinning on *Pinus patula* basal area increment in Mpumalanga. Southern African Forestry Journal 189(1):35–45. doi: 10.1080/10295925.2000.9631278
- Carlson, C. A., H. E. Burkhart, H. L. Allen and T. R. Fox. 2008. Absolute and relative changes in tree growth rates and changes to the stand diameter distribution of *Pinus taeda* as a result of midrotation fertilizer applications. Canadian Journal of Forest Research 38(7):2063–2071. doi: 10.1139/X08-050
- Castro G., S. L., A. Aldrete, J. López U. y V. M. Ordáz C. 2018. Efecto del envase, sustrato y fertilización en el crecimiento de *Pinus greggii* var. *australis* en vivero. Agrociencia 52(1):115–127.
- Chandra, M. S., M. Lal, R. K. Naresh, S. Yadav, R. Kumar, R. Kumar, S. W. Chand, N. Varsha, P. Chandan and N. Lavanya. 2019. Role of polymer coated fertilizers (PCFS) an advance technology for improving nutrient use efficiency and crop productivity: A review. International Journal of Chemical Studies 7(6):2667–2679.
- Chapell, H. N., G. F. Weetman and R. E. Miller. 1992. Proceedings from Forest Fertilization Symposium: Sustaining and Improving Nutrition and Growth of Western Forests. College of Forest Resources. University of Washington. Seattle, USA. 302 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2012. Programa de Desarrollo de Plantaciones Forestales Comerciales. A 15 años de su Creación. Zapopan, México. 191 p.
- Cooke, J. E. K., M. E. Eriksson and O. Junntila. 2012. The dynamic nature of bud dormancy in trees: Environmental control and molecular mechanisms. Plant, Cell and Environment 35(10):1707–1728. doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02552.x
- Critchfield, W. B. and E. L. Little. 1966. Geographic Distribution of the Pines of the World. USDA Forest Service Miscellaneous Publication 991. Washington, USA. 97 p.
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2007a. The significance of residual phosphorus and potassium fertiliser in countering yield decline in a fourth rotation of *Pinus patula* in Swaziland. Southern Hemisphere Forestry Journal 69(1):1–8. doi: 10.2989/SHFJ.2007.69.1.1.163

- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2007b. Effects of residual phosphorus and potassium fertiliser on organic matter and soil nutrients in a *Pinus patula* plantation. *Australian Forestry* 70(3):200–208. doi: 10.1080/00049158.2007.10675021
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2008. Growth and foliar nutrient response to recent applications of phosphorus (P) and potassium (K) and to residual P and K fertiliser applied to the previous rotation of *Pinus patula* at Usutu, Swaziland. *Forest Ecology and Management* 256(4):712–721. doi: 10.1016/j.foreco.2008.05.024
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2009a. Effect of phosphorus and potassium fertiliser on tree growth and dry timber production of *Pinus patula* on gabbro-derived soils in Swaziland. *Southern Forests* 71(3):235–243. doi: 10.2989/SF.2009.71.3.8.920
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2009b. Effect of phosphorus and potassium fertiliser on stem form, basic wood density and stem nutrient content of *Pinus patula* at various stem heights. *Australian Forestry* 72(2):99–111. doi: 10.1080/00049158.2009.10676295
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2011a. Investigating the utilization of potassium fertilizer in a *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. plantation. *Forest Science* 57(3):222–231. doi: 10.1093/forestscience/57.3.222
- Crous, J. W., A. R. Morris and M. C. Scholes. 2011b. Changes in topsoil, standing litter and tree nutrient content of a *Pinus patula* plantation after phosphorus and potassium fertilization. *European Journal of Forest Research* 130:277–292. doi: 10.1007/s10342-010-0430-z
- Desalme, D., P. Priault, D. Gérant, M. Dannoura, P. Maillard, C. Plain and D. Epron. 2017. Seasonal variations drive short-term dynamics and partitioning of recently assimilated carbon in the foliage of adult beech and pine. *New Phytologist* 213(1):140–153. doi: 10.1111/nph.14124
- Dickson, R. E. 1989. Carbon and nitrogen allocation in trees. *Annales des Sciences Forestières* 46(Supplement):631s-647s. doi: 10.1051/forest:198905art0142
- Dougherty, P. M., D. Whitehead and J. M. Vose. 1994. Environmental influences on the phenology of pine source. *Ecological Bulletins* 43:64–75.
- Dow, A. I. and S. Roberts. 1982. Proposal: critical nutrient ranges for crop diagnosis. *Agronomy Journal* 74(2):401–403. doi: 10.2134/agronj1982.00021962007400020033x
- Driessche, R. van den. 1974. Prediction of mineral nutrient status of trees by foliar analysis. *The Botanical Review* 40(3):347–394.

- Driessche, R. van den. 1985. Late season fertilization, mineral nutrient reserves, and retranslocation in planted Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) seedlings. *Forest Science* 31:485–496. doi: 10.1093/forestscience/31.2.485
- Du, C. W., J. M. Zhou and A. Shaviv. 2006. Release characteristics of nutrients from polymer-coated compound controlled release fertilizers. *Journal of Polymers and the Environment* 14:223–230. doi: 10.1007/s10924-006-0025-4
- Dvorak, W. S. 2002. *Pinus patula* Schiede & Schltldl. & Cham. In: Vozzo, J. A. (ed). Tropical tree seed manual. USDA Forest Service. Agriculture Handbook 721. Washington, DC, USA. pp: 632–635.
- Dvorak, W. S., J. K. Donahue and J. A. Vasquez. 1995. Early performance of CAMCORE introductions of *Pinus patula* in Brazil, Colombia and South Africa. *South African Forestry Journal* 174(1):23–33. doi: 10.1080/00382167.1995.9629875
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio and T. K. Stanger. 2000. *Pinus patula*. In: Conservation & Testing of Tropical & Subtropical Forest Tree Species by the CAMCORE Cooperative. College of Natural Resources. North Carolina State University. Raleigh, USA. pp: 148–173.
- Earle, C. J. 2020. *Pinus patula* Schiede ex Schlechtendahl et Chamisso 1831. The Gymnosperm Database. Disponible en: https://www.conifers.org/pi/Pinus_patula.php. [Consultado el día 29 de abril de 2020].
- Escobar S., M. C., J. J. Vargas H., J. López U., S. Espinosa Z. and A. Borja de la R. 2018. Genetic parameters for wood quality, growth and branching traits in *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 24(2):1–11. doi: 10.21829/myb.2018.2421595
- Esse, C., V. Gerding y M. J. Sanhueza. 2014. Métodos de análisis foliar aplicados bosques naturales y exóticos de interés comercial: características, ventajas y desventajas. *Sustainability, Agri, Food and Environmental Research* 2(2):1–17. doi: 10.7770/safer-V2N2-art755
- Etchevers B., J. D. 1999. Técnicas de diagnostico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra Latinoamericana* 17(3):209–219.
- Evans, J. 2005. Growth rates over four rotations of pine in Swaziland. *International Forestry Review* 7(4):305–310. doi: 10.1505/ifor.2005.7.4.305

- Evans, J. and J. Turnbull. 2004. *Plantation Forestry in the Tropics: The Role, Silviculture and Use of Planted Forests for Industrial, Social, Environmental, and Agroforestry Purposes*. 3rd ed. Oxford University Press. Oxford, UK. 482 p.
- Ewers, B. E., R. Oren and J. S. Sperry. 2000. Influence of nutrient versus water supply on hydraulic architecture and water balance in *Pinus taeda*. *Plant, Cell and Environment* 23(10):1055–1066. doi: 10.1046/j.1365-3040.2000.00625.x
- Falconer, D. S. and T. F. C. Mackay. 1996. *Introduction to Quantitative Genetics*. 4th ed. Longman Group. Essex, England. 464 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) and IFA (International Fertilizer Industry Association). 2000. *Fertilizers and their use. A pocket guide for extension officers*. 4th ed. Rome, Italy. 70 p.
- Farjon, A. 1996. Biodiversity of *Pinus (Pinaceae)* in Mexico: Speciation and palaeo-endemism. *Botanical Journal of the Linnean Society* 121(4):365–384. doi: 10.1006/bojl.1996.0041
- Farjon, A. 2010. *A Handbook of the World's Conifers*. Brill Academic Publishers. Danvers, USA. 1111 p.
- Faustino, L. I., N. M. L. Bulfe, M. A. Pinazo, S. E. Monteoliva and C. Graciano. 2013. Dry weight partitioning and hydraulic traits in young *Pinus taeda* trees fertilized with nitrogen and phosphorus in a subtropical area. *Tree Physiology* 33(3):241–251. doi: 10.1093/treephys/tps129
- Fife, D. N. and E. K. S. Nambiar. 1997. Changes in the canopy and growth of *Pinus radiata* in response to nitrogen supply. *Forest Ecology and Management* 93(1–2):137–152. doi: 10.1016/S0378-1127(96)03917-5
- Fløistad, I. S. 2002. Effects of excessive nutrient supply and short day treatment on autumn frost hardiness and time of bud break in *Picea abies* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(4):295–303. doi: 10.1080/02827580260138053
- Fløistad, I. S. and K. Kohmann. 2004. Influence of nutrient supply on spring frost hardiness and time of bud break in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) seedlings. *New Forests* 27:1–11. doi: 10.1023/A:1025085403026
- Fox, T. R. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138(1–3):187–202. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00396-0

- Fox, T. R., H. L. Allen, T. J. Albaugh, R. Rubilar and C. A. Carlson. 2006. Forest fertilization in southern pine plantations. *Better Crops* 90(3):12–15.
- Fox, T. R., H. L. Allen, T. J. Albaugh, R. Rubilar and C. A. Carlson. 2007a. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the Southern United States. *Southern Journal of Applied Forestry* 31(1):5–11. doi: 10.1093/sjaf/31.1.5
- Fox, T. R., E. J. Jokela and H. L. Allen. 2007b. The development of pine plantation silviculture in the Southern United States. *Journal of Forestry* 105(7):337–347. doi: 10.1093/jof/105.7.337
- García C., Y. B. y A. E. Sierra V. 2016. Manual de Zonificación Ecológica de Especies Forestales y Aplicación de Modelos de Simulación del Efecto del Cambio Climático. Comisión Nacional Forestal. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Zapopan, México. 138 p.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema Climático de Köppen. 5ta ed. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. 98 p.
- Garrison-Johnston, M. T., T. M. Shaw, P. G. Mika and L. R. Johnson. 2005. Management of Ponderosa Pine Nutrition. General Technical Report. PSW-GTR-198. US Department of Agriculture. Forest Service. Pacific Southwest Research Station. Albany, USA. 123–143 p.
- Gessler, A. and C. Grossiord. 2019. Coordinating supply and demand: plant carbon allocation strategy ensuring survival in the long run. *New Phytologist* 222(1):5–7. doi: 10.1111/nph.15583
- Gillespie, A. J. 1992. *Pinus patula* Schiede and Deppe. Patula pine. SO-ITF-SM-54. US Department of Agriculture. Forest Service. Southern Forest Experiment Station. New Orleans, USA. 5 p.
- Gómez-Cárdenas, M., J. J. Vargas H., J. Jasso M., A. Velásquez M. y C. Rodríguez F. 1998. Patrón de crecimiento anual del brote terminal en árboles jóvenes de *Pinus patula*. *Agrociencia* 32(4):357–363.
- Gonçalves, J. L. de M., N. F. Barros, E. K. S. Nambiar and R. F. Novais. 1997. Soil and Stand Management for Short-Rotation Plantations. *In*: Nambiar, E. K. S. and A. G. Brown (eds). Management of Soil, Nutrients and Water in Tropical Plantation Forests. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra, Australia. pp: 379–411.

- González O., M. M., J. A. Prieto R., A. Aldrete, J. C. Hernández D., J. A. Chávez S. y R. Rodríguez L. 2018. Sustratos a base de aserrín crudo con fertilización y la calidad de planta de *Pinus cooperi* Blanco en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48):203–225. doi: 10.29298/rmcf.v8i48.125
- Goodsman, D. W., V. J. Lieffers, S. M. Landhäusser and N. Erbilgin. 2010. Fertilization of lodgepole pine trees increased diameter growth but reduced root carbohydrate concentrations. *Forest Ecology and Management* 260(10):1914–1920. doi: 10.1016/j.foreco.2010.08.041
- Gotore, T., R. Murepa and W. J. Gapare. 2014. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the early growth of *Pinus patula* and *Eucalyptus grandis*. *Journal of Tropical Forest Science* 26(1):22–31.
- Haase, D. L., R. Rose and J. Trobaugh. 2006. Field performance of three stock sizes of Douglas-fir container seedlings grown with slow-release fertilizer in the nursery growing medium. *New Forests* 31(1):1–24. doi: 10.1007/s11056-004-5396-6
- Hacke, U. G., J. S. Sperry, B. E. Ewers, D. S. Ellsworth and K. V. R. Schäfer. 2000. Influence of soil porosity on water use in *Pinus taeda*. *Oecologia* 124(4):495–505.
- Haifa Group. 2014. Multicote™ Agri. Fertilizantes de liberación controlada para la agricultura. Manual. Matam-Haifa, Israel. 26 p.
- Hernández C., A. and R. Rubilar P. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada y fosforada en el desarrollo y fenología de brotes de setos de *Pinus radiata*. *Bosque* 33(1):53–61. doi: 10.4067/s0717-92002012000100006
- Hernández V., R. R., M. Á. López L. y P. Flores N. 2018. Crecimiento y estado nutrimental de una plantación de *Pinus cooperi* Blanco fertilizada con N-P-K. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48):115–134. doi: 10.29298/rmcf.v8i48.123
- Hunt, G. A. 1989. Effect of controlled-release fertilizers on growth and mycorrhizae in container-grown Engelmann spruce. *Western Journal of Applied Forestry* 4(4):129–131. doi: 10.1093/wjaf/4.4.129
- Hunt, R. 1990. *Basic Growth Analysis*. Unwin Hyman. London, UK. 112 p.
- Ibañez, C., P. Núñez, R. Pezzutti y F. Rodríguez. 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del Noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Bosque* 25(2):69–76. doi: 10.4067/s0717-92002004000200007

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2013. Conjunto de datos Perfiles de Suelos. Escala 1:250 000 Serie II (Continuo Nacional). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825266707>. [Consultado el día 23 de mayo de 2020].
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática). 2018. Marco geoestadístico nacional, diciembre 2018. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463674658>. [Consultado el día 21 de septiembre de 2019].
- Islam, M. A., K. G. Apostol, D. F. Jacobs and R. K. Dumroese. 2009. Fall fertilization of *Pinus resinosa* seedlings: nutrient uptake, cold hardiness, and morphological development. *Annals of Forest Science* 66(7):704, 1–9. doi: 10.1051/forest/2009061
- Jacobs, D. F., R. Rose and D. L. Haase. 2003. Incorporating controlled-release fertilizer technology into outplanting. *In*: Riley, L. E., R. K. Dumroese and T. D. Landis (tech. coords.). National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations - 2002. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Ogden, USA. pp: 37–42.
- Jacobs, D. F., K. F. Salifu and J. R. Seifert. 2005. Growth and nutritional response of hardwood seedlings to controlled-release fertilization at outplanting. *Forest Ecology and Management* 214(1–3):28–39. doi: 10.1016/j.foreco.2005.03.053
- Jacobs, D. F. and V. R. Timmer. 2005. Fertilizer-induced changes in rhizosphere electrical conductivity: Relation to forest tree seedling root system growth and function. *New Forests* 30(2–3):147–166. doi: 10.1007/s11056-005-6572-z
- Jokela, E. J. and A. J. Long. 2018. Using Soils to Guide Fertilizer Recommendations for Southern Pines. IFAS Extension. Circular 1230. University of Florida. Gainesville, USA. 1–13 p.
- Jokela, E. J., T. A. Martin and J. G. Vogel. 2010. Twenty-five years of intensive forest management with southern pines: Important lessons learned. *Journal of Forestry* 108(7):338–347. doi: 10.1093/jof/108.7.338
- Kageyama, P. Y., R. M. Speltz y A. P. Silva. 1977. Variação genética entre e dentro de progênies de *Pinus patula* Schiede e Deppe na região de Telêmaco Borba - PR. *IPEF* 15:21–39.
- Knecht, M. F. and A. Göransson. 2004. Terrestrial plants require nutrients in similar proportions. *Tree Physiology* 24(4):447–460. doi: 10.1093/treephys/24.4.447

- Kou, L., D. Guo, H. Yang, W. Gao and S. Li. 2015. Growth, morphological traits and mycorrhizal colonization of fine roots respond differently to nitrogen addition in a slash pine plantation in subtropical China. *Plant and Soil* 391(1–2):207–218. doi: 10.1007/s11104-015-2420-x
- Kozłowski, T. T. 1964. Shoot growth in woody plants. *The Botanical Review* 30(3):335–392.
- Kozłowski, T. T. 1992. Carbohydrate sources and sinks in woody plants. *The Botanical Review* 58(2):107–222. doi: 10.1007/BF02858600
- Kozłowski, T. T. and S. G. Pallardy. 1997. *Physiology of Woody Plants*. 2nd ed. Academic Press. San Diego, USA. 411 p.
- Ladrach, W. E. and C. Lambeth. 1991. Growth and heritability estimates for a seven-year-old open-pollinated *Pinus patula* progeny test in Colombia. *Silvae Genetica* 40(5–6):169–173.
- Landis, T. D. and R. K. Dumroese. 2009. Using polymer-coated controlled-release fertilizers in nursery and after outplanting. *Forestry Nursery Notes Winter*:5–12. doi: 10.3406/ahess.1997.279587
- Landsberg, J. and P. Sands. 2011. *Physiological Ecology of Forest Production*. Terrestrial Ecology Series. Academic Press. San Diego, USA. 331 p.
- Lázaro D., M. O., J. Velázquez M., J. J. Vargas H., A. Gómez G., M. E. Álvarez S. y M. A. López L. 2012. Fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio en un latizal de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 18(1):33–42. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.01.001
- LeBauer, D. S. and K. K. Treseder. 2008. Nitrogen limitation of Net Primary Productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology* 89(2):371–379. doi: 10.1890/06-2057.1
- León S., M. A., J. L. Reyes P., G. Herrero E. y V. E. Pérez L. 2016. Efecto de la fertilización sobre el crecimiento en diámetro y altura de *Pinus caribaea* en plantaciones del occidente de Cuba. *Madera y Bosques* 22(3):87–101. doi: 10.21829/myb.2016.2231115
- Li, B., S. E. McKeand and H. L. Allen. 1991. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. *Forest Science* 37(2):613–626.
- Li, Y., M. Suontama, R. D. Burdon and H. S. Dungey. 2017. Genotype by environment interactions in forest tree breeding : review of methodology and perspectives on research and application. *Tree Genetics and Genomes* 13:60, 1–18. doi: 10.1007/s11295-017-1144-x

- Li, Y., J. Xue, P. W. Clinton and H. S. Dungey. 2015. Genetic parameters and clone by environment interactions for growth and foliar nutrient concentrations in radiata pine on 14 widely diverse New Zealand sites. *Tree Genetics and Genomes* 11:10, 1–16. doi: 10.1007/s11295-014-0830-1
- Liesche, J. and A. Schulz. 2018. Phloem transport in gymnosperms: a question of pressure and resistance. *Current Opinion in Plant Biology* 43:36–42. doi: 10.1016/j.pbi.2017.12.006
- Lindgren, P. M. F., T. P. Sullivan, D. S. Sullivan, R. P. Brockley and R. Winter. 2007. Growth response of young lodgepole pine to thinning and repeated fertilization treatments: 10-Year results. *Forestry* 80(5):587–611. doi: 10.1093/forestry/cpm039
- Littell, R. C., G. A. Milliken, W. W. Stroup, R. D. Wolfinger and O. Schabenberger. 2006. SAS^(R) for Mixed Models. 2nd ed. SAS Institute. Cary, USA. 814 p.
- López-Upton, J., T. L. White and D. A. Huber. 1999. Effects of site and intensive culture on family differences in early growth and rust incidence of loblolly and slash pine. *Silvae Genetica* 48(6):284–293.
- López L., M. Á. y E. Estañol B. 2014. Fertilización química, crecimiento y ataque de pájaro carpintero (*Sphyrapicus varius*) en *Pinus patula* Schl. et Cham. VI Congreso Forestal Latinoamericano. Morelia, México. 2 p.
- Louw, J. R. and M. C. Scholes. 2003. Foliar nutrient levels as indicators of site quality for *Pinus patula* in the Mpumalanga escarpment area. *The Southern African Forestry Journal* 197(1):21–30. doi: 10.1080/20702620.2003.10431718
- Luis D., V. C., J. Climent M., J. Peters, E. Pérez M., J. Puértolas S., D. Morales M., M. S. Jiménez P. y L. Gil S. 2004. Evaluación de la calidad de plántulas de *Pinus canariensis* cultivadas con diferentes métodos en la supervivencia y crecimiento en campo. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 17:63–67. doi: 10.31167/csef.v0i17.9400
- Macy, P. 1936. The quantitative mineral nutrient requirements of plants. *Plant Physiology* 11(4):749–764. doi: 10.1104/pp.11.4.749
- Maggard, A. O., R. E. Will, D. S. Wilson, C. R. Meek and J. G. Vogel. 2017. Fertilization can compensate for decreased water availability by increasing the efficiency of stem volume production per unit of leaf area for loblolly pine (*Pinus taeda*) stands. *Canadian Journal of Forest Research* 47(4):445–457. doi: 10.1139/cjfr-2016-0422

- Maier, C. A., T. J. Albaugh, H. L. Allen and P. M. Dougherty. 2004. Respiratory carbon use and carbon storage in mid-rotation loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations: The effect of site resources on the stand carbon balance. *Global Change Biology* 10:1335–1350. doi: 10.1111/j.1529-8817.2003.00809.x
- Maliondo, S. M. S., E. B. Mtui, S. A. O. Chamshama, V. R. Nsolomo, B. M. Msanya and M. L. Mhando. 2005. Early response of second-rotation *Pinus patula* stands to nitrogen and phosphate fertilizers at Sao Hill forest plantation, Tanzania. *Journal of Tropical Forest Science* 17(1):413–418.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3rd ed. Academic Press. San Diego, USA. 651 p.
- Martins, P., L. Sampedro, X. Moreira and R. Zas. 2009. Nutritional status and genetic variation in the response to nutrient availability in *Pinus pinaster*. A multisite field study in Northwest Spain. *Forest Ecology and Management* 258(7):1429–1436. doi: 10.1016/j.foreco.2009.06.041
- Mavimbela, L. Z., J. W. Crous, A. R. Morris and P. W. Chirwa. 2018. The importance of harvest residue and fertiliser on productivity of *Pinus patula* across various sites in their first, second and third rotations, at Usutu Swaziland. *New Zealand Journal of Forestry Science* 48:5, 1–14. doi: 10.1186/s40490-018-0110-1
- May, B., P. Smethurst, C. Carlyle, D. Mendham, J. Bruce and C. Baillie. 2009. *Review of Fertiliser Use in Australian Forestry*. Project No. RC072-0708. Forest & Wood Products Australia. Melbourne, Australia. 96 p.
- Mengel, K., E. A. Kirkby, H. Kosegarten and T. Appel. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. 5th ed. Springer Science+Business Media. Dordrecht, The Netherlands. 849 p.
- Meza J., D. J., J. J. Vargas H., J. López U., H. Vaquera H. y A. Borja de la R. 2005. Determinación de la edad de transición de madera juvenil a madura en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Ra Ximhai* 1(2):305–324.
- Miller, H. G. 2004. Nutrient Limitations and Fertilization. *In*: Burley, J., J. Evans and J. A. Youngquist (eds). *Encyclopedia of Forest Sciences*. Elsevier. Oxford, UK. pp: 1235–1241.
- Minchin, P. E. H. and A. Lacoite. 2005. New understanding on phloem physiology and possible consequences for modelling long-distance carbon transport. *New Phytologist* 166:771–779. doi: 10.1111/j.1469-8137.2005.01323.x

- Misson, L., G. du Bus de Warnaffe and M. Jonard. 2001. Effects of fertilization on the vascular ground vegetation of european beech (*Fagus sylvatica* L.) and sessile oak (*Quercus petraea* (Matt.) Lieb.) stands. *Annals of Forest Science* 58(8):829–842. doi: 10.1051/forest:2001166
- Monroy R., C. R. 1995. *Pinus patula* Schl. et Cham, en México. Folleto Técnico No. 29. SAGARPA/CIRGOC-INIFAP. Tlapacoyan, México. 145 p.
- Morales G., E., J. López U., J. J. Vargas H., C. Ramírez H. y A. Gil M. 2013. Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(2):155–162.
- Morland, C., F. Schier, N. Janzen and H. Weimar. 2018. Supply and demand functions for global wood markets: Specification and plausibility testing of econometric models within the global forest sector. *Forest Policy and Economics* 92:92–105. doi: 10.1016/j.forpol.2018.04.003
- Morris, A. R. 2003. Site and stand age effects on fertiliser responses in *Pinus patula* pulpwood plantations in Swaziland. *Southern African Forestry Journal* 199(1):27–39. doi: 10.1080/20702620.2003.10431747
- Mullin, T. J., B. Andersson, J.-C. Bastien, J. Beaulieu, R. D. Burdon, W. S. Dvorak, J. N. King, T. Kondo, J. Krakowski, S. J. Lee, S. E. Mckeand, L. Pâques, A. Raffin, J. H. Russell, T. Skrøppa, M. Stoehr and A. Yanchuk. 2011. Economic Importance, Breeding Objectives and Achievements. *In: Plomion, C., J. Bousquet and C. Kole (eds). Genetics, Genomics and Breeding of Conifers.* CRC Press. Taylor & Francis Group. Clemson, US. pp: 40–127.
- Munsell, J. F. and T. R. Fox. 2010. An analysis of the feasibility for increasing woody biomass production from pine plantations in the southern United States. *Biomass and Bioenergy* 34(12):1631–1642. doi: 10.1016/j.biombioe.2010.05.009
- Naik, M. R., B. K. Kumar and K. Manasa. 2017. Polymer coated fertilizers as advance technique in nutrient management. *Asian Journal of Soil Science* 12(1):228–232. doi: 10.15740/has/ajss/12.1/228-232
- Needham, T. D., J. A. Burger and R. G. Oderwald. 1990. Relationship between Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) optima and foliar nutrient critical levels. *Soil Science Society of America Journal* 54(3):883–886. doi: 10.2136/sssaj1990.03615995005400030045x
- Nigro, S. A. 2008. Plant resources of tropical Africa. *Pinus patula* Schltldl. & Cham. Disponible en: [https://uses.plantnet-project.org/en/Pinus_patula_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/en/Pinus_patula_(PROTA)). [Consultado el día 27 de

noviembre de 2018].

- Olbrich, K., S. I. Christie, B. Olbrich, J. Evans, D. Everard and R. J. Scholes. 1997. Factors influencing the long term sustainability of the South African forest industry. *Southern African Forestry Journal* 178(1):53–58. doi: 10.1080/10295925.1997.9631139
- Oliet, J., M. L. Segura, F. Martin D., E. Blanco, R. Serrada, M. López A. y F. Artero. 1999. Los fertilizantes de liberación controlada lenta aplicados a la producción de planta forestal de vivero. Efecto de dosis y formulaciones sobre la calidad de *Pinus halepensis* Mill. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 8(1):207–228.
- Pan, J., D. F. Jacobs and G. Li. 2017. Combined effects of short-day treatment and fall fertilization on growth, nutrient status, and spring bud break of *Pinus tabulaeformis* seedlings. *iForest* 10:242–249. doi: 10.3832/ifor2178-009
- Paquette, A. and C. Messier. 2010. The role of plantations in managing the world's forests in the Anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment* 8(1):27–34. doi: 10.1890/080116
- Patiño V., F. and P. Y. Kageyama. 1991. *Pinus patula* Schiede & Deppe. Seedleaflet No. 8A. Danida Forest Seed Centre. Humlebæk, Denmark. 31 p.
- Payn, T., J. M. Carnus, P. Freer-Smith, M. Kimberley, W. Kollert, S. Liu, C. Orazio, L. Rodriguez, L. N. Silva and M. J. Wingfield. 2015. Changes in planted forests and future global implications. *Forest Ecology and Management* 352:57–67. doi: 10.1016/j.foreco.2015.06.021
- Pérez C., M., M. Á. López L., A. Equihua M., V. M. Cetina A. and J. T. Méndez M. 2013. Relationships between site factors and bark beetle attack on pine trees. *Journal of Biological Sciences* 13(7):621–627. doi: 10.3923/jbs.2013.621.627
- Pérez S., F., E. Figueroa H., R. M. García N. y L. Godínez M. (eds). 2017. *Genética y Fertilización en la Producción Agrícola. Ciencias de la Biología, Agronomía y Economía. Vol. I. Handbook T-I. ECORFAN. Texcoco, México. 125 p.*
- Perry, J. P. 1991. *The Pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, USA. 231 p.
- Pinno, B. D., V. J. Lieffers and S. M. Landhäusser. 2012. Inconsistent growth response to fertilization and thinning of lodgepole pine in the Rocky Mountain foothills is linked to Site Index. *International Journal of Forestry Research* :193975, 1–7. doi: 10.1155/2012/193975
- Ramírez-Alzate, M. V., R. A. Rubilar, C. Montes, H. L. Allen, T. R. Fox and E. Sanfuentes. 2016. Mid-rotation response to fertilizer by *Pinus radiata* D. Don at three contrasting sites. *Journal of Forest Science* 62(4):153–162. doi: 10.17221/106/2015-JFS

- Reuter, D. and J. B. Robinson. 1997. Plant Analysis: An Interpretation Manual. 2nd ed. CSIRO Publishing. Australia. 572 p.
- Reyes-Millalón, J., V. Gerding y O. Thiers-Espinoza. 2012. Fertilizantes de liberación controlada aplicados al establecimiento de *Pinus radiata* D. Don en Chile. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 18(3):313–328. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.08.060
- Richards, B. N. and D. I. Bevege. 1972. Principles and practice of foliar analysis as a basis for crop-logging in pine plantations. I. Basic considerations. Plant and Soil 36:109–119. doi: 10.1007/BF01373461
- Rose, R., D. L. Haase y E. Arellano. 2004. Fertilizantes de entrega controlada: potencial para mejorar la productividad de la reforestación. Bosque 25(2):89–100. doi: 10.4067/s0717-92002004000200009
- Rubilar, R., L. Blevins, J. Toro, A. Vita and F. Muñoz. 2008a. Early response of *Pinus radiata* plantations to weed control and fertilization on metamorphic soils of the Coastal Range, Maule Region, Chile. Bosque 29(1):74–84. doi: 10.4067/s0717-92002008000100009
- Rubilar, R., T. Fox, L. H. Allen, T. Albaugh y C. Carlson. 2008b. Manejo intensivo al establecimiento de plantaciones forestales de *Pinus* sp. y *Eucalyptus* sp. en Chile y Argentina. Informaciones Agronómicas 40:1–6.
- Sáenz-Romero, C., J. Beaulieu y G. E. Rehfeldt. 2011. Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. Agrociencia 45(3):399–411.
- Sáenz-Romero, C., H. Nienstaedt and J. J. Vargas H. 1994. Performance of *Pinus patula* genotypes selected in South Africa and growing in their native Mexican environment. Silvae Genetica 43(2–3):73–81.
- Salaya D., J. M., J. López U. y J. J. Vargas H. 2012. Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *Pinus patula*. Agrociencia 46(5):519–534.
- Salazar G., J. G., J. J. Vargas H., J. Jasso M., J. D. 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.
- Salgado G., S. y R. Núñez E. (coords.). 2012. Manejo de Fertilizantes Químicos y Orgánicos. 1era Reimp. Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 146 p.

- Samuelson, L. J., M. B. Kane, D. Markewitz, R. O. Teskey, M. K. Akers, T. A. Stokes, C. J. Pell and J. Qi. 2018. Fertilization increased leaf water use efficiency and growth of *Pinus taeda* subjected to five years of throughfall reduction. *Canadian Journal of Forest Research* 48(2):227–236. doi: 10.1139/cjfr-2017-0357
- Sánchez P., A., M. Á. López L., A. Gómez G. and M. Pérez S. 2018. Critical nutrient concentrations and DRIS norms for *Pinus patula*. Preprints January:1–13. doi: 10.20944/preprints201801.0011.v1
- SAS Institute. 2015. The Mixed Procedure. *In: SAS/STAT^(R) 14.1 User's Guide*. SAS Institute. Cary, USA. pp: 6048–6257.
- Sauerbeck, D. R. and H. M. Helal. 1990. Factors Affecting the Nutrient Efficiency of Plants. *In: El Bassam, N., M. Dambroth and B. C. Loughman (eds). Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. pp: 11–17.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca). 1998. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 1997. Subsecretaría de Recursos Naturales. Dirección General Forestal. México, D.F. 120 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. México, D.F. 73 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2003. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2002. Subsecretaría de Recursos Naturales. Dirección General Forestal. México, D.F. 156 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2008. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2007. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. México, D.F. 235 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2012. Dirección General de Gestión Forestal y de Suelos. México, D.F. 232 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2020a. Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2017. Ciudad de México, México. 285 p.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2020b. Consulta Temática. Plantaciones Forestales Comerciales (hectáreas). Disponible en:

http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RFORESTA09_02&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=* &NOMBREANIO=*. [Consultado el día 31 de mayo de 2020].

- Smethurst, P. J. 2010. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture. *Plant and Soil* 335:83–100. doi: 10.1007/s11104-010-0316-3
- Smith, P. F. 1962. Mineral analysis of plant tissues. *Annual Review of Plant Physiology* 13:81–108. doi: 10.1146/annurev.pp.13.060162.000501
- Steenbjerg, F. 1951. Yield curves and chemical plant analyses. *Plant and Soil* III(2):97–109. doi: 10.1007/BF01676368
- Štofko, P. 2010. Effects of slow-release fertilizers of Silvamix and Silvagen line on growth of a young spruce and larch forest plantation three years after application. *Folia Forestalia Polonica, Series A* 52(1):54–60. doi: 10.5281/zenodo.30866
- Styles, B. T. 1993. Genus *Pinus*: a Mexican Purview. *In*: Ramamoorthy, T. P., R. Bye, A. Lot and J. Fa (eds). *Biological Diversity of Mexico: Origins and Distribution*. Oxford University Press. New York, USA. pp: 397–420.
- Subedi, P., E. J. Jokela, J. G. Vogel and T. A. Martin. 2019. Sustained productivity of intensively managed loblolly pine plantations: Persistence of fertilization and weed control effects across rotations. *Forest Ecology and Management* 446:38–53. doi: 10.1016/j.foreco.2019.05.025
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant Physiology*. 5th ed. Sinauer Associates. Sunderland, USA. 778 p.
- Titshall, L., S. Dovey and D. Rietz. 2013. A review of management impacts on the soil productivity of South African commercial forestry plantations and the implications for multiple-rotation productivity. *Southern Forests* 75(4):169–183. doi: 10.2989/20702620.2013.858210
- Trazzi, P. A., J. A. dos Santos, M. V. W. Caldeira, D. F. Roters, D. Carvalho and M. Dobner Júnior. 2019. Initial growth of *Pinus taeda* by fertilization response at planting. *Floresta e Ambiente* 26(Spec No 1):1–9. doi: 10.1590/2179-8087.037018
- Trichet, P., M. R. Bakker, L. Augusto, P. Alazard, D. Merzeau and E. Saur. 2009. Fifty years of fertilization experiments on *Pinus pinaster* in Southwest France: The importance of phosphorus as a fertilizer. *Forest Science* 55(5):390–402. doi: 10.1093/forestscience/55.5.390

- Turner, J. and M. Lambert. 2013. Analysing inter-rotational productivity and nutrition in a New South Wales radiata pine plantation. *New Forests* 44(5):785–798. doi: 10.1007/s11056-013-9369-5
- Turner, J., M. J. Lambert and F. R. Humphreys. 2002. Continuing growth response to phosphate fertilizers by a *Pinus radiata* plantation over fifty years. *Forest Science* 48(3):556–568. doi: 10.1093/forestscience/48.3.556
- Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annual Review of Plant Physiology* 3:207–228. doi: 10.1146/annurev.pp.03.060152.001231
- Ulrich, A. and F. J. Hills. 1967. Principles and Practices of Plant Analysis. *In*: Hardy, G. W. (ed). Soil Testing and Plant Analysis. II. Plant Analysis. Soil Science Society of America. Madison, USA. pp: 11–24.
- UNIDO (United Nations Industrial Development Organization) and IFDC (International Fertilizer Development Center). 1998. Fertilizer Manual. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. 615 p.
- USDA (US Department of Agriculture) and NRCS (Natural Resources Conservation Service). 2020. *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. The PLANTS Database. National Plant Data Team. Disponible en: <https://plants.usda.gov/core/profile?symbol=PIPA13>. [Consultado el día 22 de marzo de 2020].
- Valencia M., S. y J. J. Vargas H. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. *Agrocencia* 35(1):109–120.
- Valencia M., S., J. J. Vargas H., J. D. Molina G. y J. Jasso M. 1996. Control genético de la velocidad de crecimiento y características de la madera en *Pinus patula*. *Agrocencia* 30(2):265–273.
- Vargas H., J. J. y J. López U. 2004. Diseños Genéticos y Métodos Estadísticos en la Evaluación del Germoplasma de Especies Forestales. *In*: Vargas H., J. J., B. Bermejo V. y T. F. Ledig (eds). Manejo de Recursos Genéticos Forestales. 2da ed. Colegios de Postgraduados. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, México. pp: 128–145.
- Vásquez G., I., M. Á. López L., G. Ángeles P., A. Trinidad S., M. Jiménez C. y G. Aguilar B. 2015. Aclareo y fertilización química en la productividad primaria neta de plantaciones de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6(31):82–93.

- Vázquez C., I., J. A. Prieto R., M. A. López L., C. Wehenkel, P. A. Domínguez C. and F. E. Muñoz S. 2018. Growth and survival of a plantation of *Pinus greggii* Engelm. ex Parl. var. *greggii* under different fertilization treatments. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 24(2):251–264. doi: 10.5154/r.rchscfa.2017.05.036
- Vela G., L. 1980. Contribución a la ecología de *Pinus patula*. Publicación especial No. 19. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. México, D.F. 104 p.
- Velázquez M., A., G. Ángeles P., T. Llanderal O., A. R. Román J. y V. Reyes H. 2004. Monografía de *Pinus patula*. Comisión Nacional Forestal. Colegio de Postgraduados. Zapolan, México. 124 p.
- Villar-Salvador, P., M. Uscola and D. F. Jacobs. 2015. The role of stored carbohydrates and nitrogen in the growth and stress tolerance of planted forest trees. *New Forests* 46(5):813–839. doi: 10.1007/s11056-015-9499-z
- Virginia Tech y USDA Forest Service. 2020. Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico. Disponible en: <http://charcoal.cnre.vt.edu/climate/>. [Consultado el día 31 de may de 2020].
- Walker, R. F. and C. D. Hunt. 1999. Growth and nutrition of containerized singleleaf pinyon seedlings in response to controlled release fertilization. *Arid Soil Research and Rehabilitation* 13(2):123–132. doi: 10.1080/089030699263366
- Ward, E. J., J. C. Domec, M. A. Laviner, T. R. Fox, G. Sun, S. McNulty, J. King and A. Noormets. 2015. Fertilization intensifies drought stress: Water use and stomatal conductance of *Pinus taeda* in a midrotation fertilization and throughfall reduction experiment. *Forest Ecology and Management* 355:72–82. doi: 10.1016/j.foreco.2015.04.009
- Waring, R. H. and G. B. Pitman. 1985. Modifying lodgepole pine stands to change susceptibility to mountain pine beetle attack. *Ecology* 66(3):889–897. doi: 10.2307/1940551
- Wells, C. and L. Allen. 1985. A Loblolly Pine Management Guide: When and Where to Apply Fertilizer. GTR SE-36. US Department of Agriculture. Forest Service. Southern Forest Experiment Station. Asheville, USA. 23 p.
- Wells, C. G. 1969. Foliage Sampling Guides for Loblolly Pine. Forest Service Research Note SE-113. Research Triangle Park, USA. 3 p.

- White, T. L., W. T. Adams and D. B. Neale. 2007. *Forest Genetics*. CABI Publishing. Cambridge, USA. 682 p.
- Wikström, F. 1994. A theoretical explanation of the Piper-Steenbjerg effect. *Plant, Cell and Environment* 17(9):1053–1060. doi: 10.1111/j.1365-3040.1994.tb02028.x
- Willan, R. L. 1988. *Benefits from Tree Improvement*. Lecture Note No. A-2. Danida Forest Seed Centre. Humlebæk, Denmark. 22 p.
- Willan, R. L., K. Olesen and H. Barner. 1989. *Natural Variation as a Basis for Tree Improvement*. Lecture Note No. A-3. Danida Forest Seed Centre. Humlebæk, Denmark. 13 p.
- Williams, D. R., B. M. Potts and P. J. Smethurst. 2003. Promotion of flowering in *Eucalyptus nitens* by paclobutrazol was enhanced by nitrogen fertilizer. *Canadian Journal of Forest Research* 33(1):74–81. doi: 10.1139/x02-157
- Wormald, T. J. 1975. *Pinus patula*. Tropical Forestry Papers No. 7. Oxford, UK. 212 p.
- Wright, J. A. 1994. *Utilization of Pinus patula: An Annotated Bibliography*. O.F.I. Occasional Papers No. 45. Oxford, UK. 73 p.
- Wright, J. A., L. F. Osorio and W. S. Dvorak. 1995. Recent developments in a tree improvement program with *Pinus patula* in Colombia. *Forest Ecology and Management* 72(2–3):229–234. doi: 10.1016/0378-1127(94)03457-8
- Zas, R., F. Pichel, P. Martíns and J. Fernández-López. 2006. Fertilization x genotype interaction in *Pinus radiata* open pollinated families planted in three locations in Galicia (NW Spain). *New Forests* 32(3):253–263. doi: 10.1007/s11056-006-9000-0
- Zhang, Y., Z. Zhou and Q. Yang. 2013. Genetic variations in root morphology and phosphorus efficiency of *Pinus massoniana* under heterogeneous and homogeneous low phosphorus conditions. *Plant and Soil* 364(1–2):93–104. doi: 10.1007/s11104-012-1352-y
- Zhao, D., M. Kane, R. Teskey, T. R. Fox, T. J. Albaugh, H. L. Allen and R. Rubilar. 2016. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States. *Forest Ecology and Management* 375:105–111. doi: 10.1016/j.foreco.2016.05.035
- Zobel, B. and J. Talbert. 1984. *Applied Forest Tree Improvement*. John Wiley & Sons. New York, USA. 505 p.

ANEXOS

ANEXO A. CONCENTRACIONES FOLIARES BASE PARA DISEÑAR LOS TRATAMIENTOS DE FERTILIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO NUTRIMENTAL BASADO EN LAS CONCENTRACIONES CRÍTICAS OBTENIDAS POR SÁNCHEZ *ET AL.* (2018).

Identificación	N (%)	P (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)
Árboles no sobresalientes					
Muestra Compuesta # 1	1.33	2003.70	9479.75	1077.71	1649.17
Muestra Compuesta # 2	2.24	2096.87	8873.34	1036.91	1150.24
Muestra Compuesta # 3	1.89	2389.35	10132.00	1202.64	1695.23
Valor Promedio (A)	1.82	2163.31	9495.03	1105.75	1498.21
Concentraciones Críticas (B)	1.49	1300.00	6300.00	3300.00	1400.00
Diagnóstico nutrimental (B-A)	0.33	863.31	3195.03	-2194.25	98.21
Árboles sobresalientes					
Muestra Compuesta # 1	1.68	2123.03	7097.34	1224.90	1245.67
Muestra Compuesta # 2	1.82	2231.16	9782.76	1049.83	1418.61
Muestra Compuesta # 3	1.54	1733.35	8261.08	895.34	1359.88
Valor Promedio (A)	1.68	2029.18	8380.39	1056.69	1341.39
Concentraciones Críticas (B)	1.49	1300.00	6300.00	3300.00	1400.00
Diagnóstico nutrimental (B-A)	0.19	729.18	2080.39	-2243.31	-58.61
	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)
Árboles no sobresalientes					
Muestra Compuesta # 1	75.83	3.31	16.45	132.39	26.09
Muestra Compuesta # 2	95.55	4.76	19.44	107.27	22.96
Muestra Compuesta # 3	110.77	3.97	18.15	149.90	25.86
Valor Promedio (A)	94.05	4.02	18.01	129.85	24.97
Concentraciones Críticas (B)	118.69	2.14	30.60	187.47	11.25
Diagnóstico nutrimental (B-A)	-24.64	1.88	-12.59	-57.62	13.72
Árboles sobresalientes					
Muestra Compuesta # 1	92.321	2.92	22.85	111.76	23.10
Muestra Compuesta # 2	82.418	4.28	19.05	82.73	25.54
Muestra Compuesta # 3	64.121	2.77	10.62	86.92	21.49
Valor Promedio (A)	79.62	3.32	17.51	93.81	23.38
Concentraciones Críticas (B)	118.69	2.14	30.60	187.47	11.25
Diagnóstico nutrimental (B-A)	-39.07	1.18	-13.10	-93.67	12.13

Los nutrimentos deficientes, en orden de importancia son: Ca, Mn, Fe y Zn.

**ANEXO B. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL SUELO EN EL SITIO
EXPERIMENTAL DE PUEBLO NUEVO, CHIGNAHUAPAN, PUEBLA**

Identificación	pH	Conductividad eléctrica (dS/m)	Materia orgánica (%)	N (%)	NO₃⁻ (ppm)
Muestra Compuesta # 1	5.55	0.49	3.03	0.10	30.80
Muestra Compuesta # 2	5.38	0.04	1.13	0.08	30.80
Muestra Compuesta # 3	5.42	0.04	3.17	0.09	28.00
Promedio	5.45	0.19	2.45	0.09	29.87

Identificación	NH₄⁺ (ppm)	P (ppm)	Ca (meq/100 g)	Mg (meq/100 g)	K (meq/100 g)
Muestra Compuesta # 1	42.00	20.21	3.62	0.67	0.23
Muestra Compuesta # 2	36.40	9.85	2.61	0.81	0.38
Muestra Compuesta # 3	36.40	13.99	18.13	1.60	0.17
Promedio	38.27	14.68	8.12	1.03	0.26

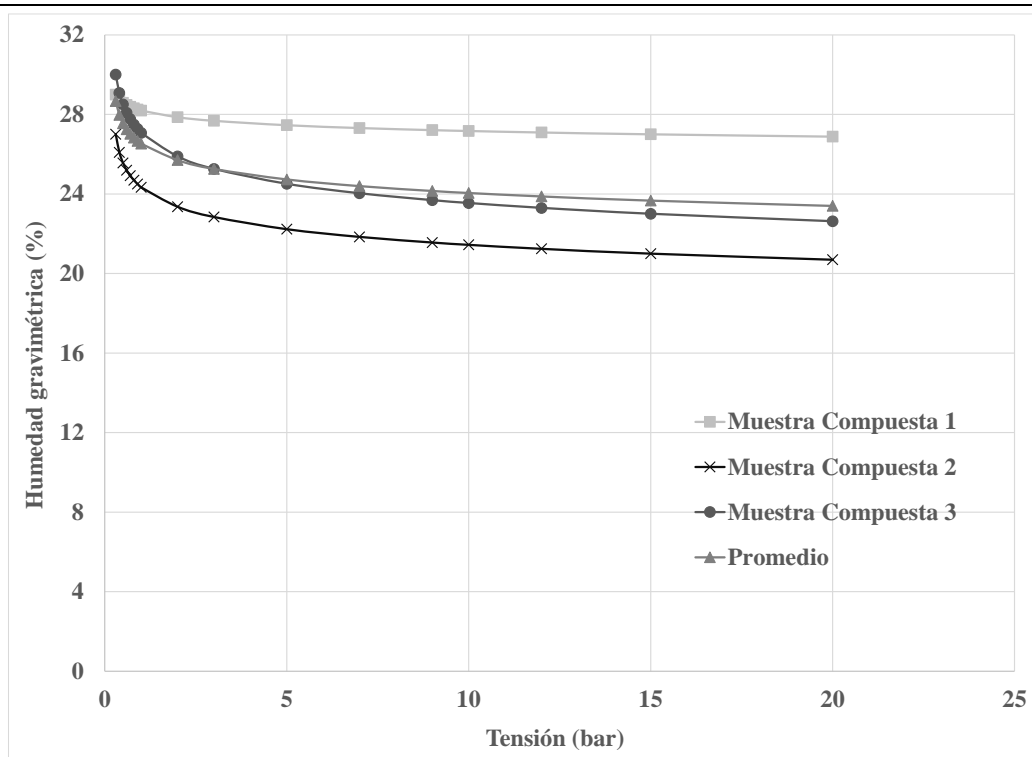
Identificación	Na (meq/100 g)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)
Muestra Compuesta # 1	0.25	1.53	23.48	54.50
Muestra Compuesta # 2	0.24	0.55	12.25	22.47
Muestra Compuesta # 3	0.79	0.66	25.99	27.98
Promedio	0.43	0.91	20.57	34.98

Identificación	Mo (ppm)	Zn (ppm)	Densidad real (g/cm³)	Densidad aparente (g/cm³)
Muestra Compuesta # 1	N/D	0.80	1.97	1.14
Muestra Compuesta # 2	N/D	0.55	2.19	1.30
Muestra Compuesta # 3	0.02	0.81	2.08	1.13
Promedio	0.02	0.72	2.08	1.19

Identificación	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Textura
Muestra Compuesta # 1	45.08	33.64	21.28	Arcillosa
Muestra Compuesta # 2	47.08	29.64	23.28	Arcillosa
Muestra Compuesta # 3	40.72	32.00	27.28	Arcillosa
Promedio	44.29	31.76	23.95	Arcillosa

CURVAS DE RETENCIÓN DE HUMEDAD

Tensión (bar)	Humedad gravimétrica (%)			Humedad gravimétrica promedio
	<i>Muestra Compuesta #1</i>	<i>Muestra Compuesta #2</i>	<i>Muestra Compuesta #3</i>	
20.0	26.88	20.69	22.62	23.40
15.0	27.00	21.00	23.00	23.67
12.0	27.09	21.24	23.30	23.88
10.0	27.17	21.44	23.54	24.05
9.00	27.21	21.56	23.69	24.15
7.00	27.31	21.84	24.03	24.40
5.00	27.46	22.23	24.51	24.73
3.00	27.68	22.84	25.26	25.26
2.00	27.86	23.36	25.89	25.70
1.00	28.19	24.33	27.07	26.53
0.90	28.25	24.50	27.27	26.67
0.80	28.31	24.69	27.49	26.83
0.70	28.38	24.92	27.76	27.02
0.60	28.47	25.20	28.09	27.25
0.50	28.59	25.56	28.50	27.55
0.40	28.75	26.09	29.08	27.97
0.30	29.00	27.00	30.00	28.67



ANEXO C. DATOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS DEL ENSAYO DE PROGENIES Y EL ÁREA DE RECOLECTA DE LAS FAMILIAS DE *PINUS PATULA* SELECCIONADAS; DATOS OBTENIDOS DE VIRGINIA TECH Y USDA FOREST SERVICE (2020) TOMANDO EN CONSIDERACIÓN A GARCÍA Y SIERRA (2016).

Variable \ Zona	Longitud (° ' '' , O)	Latitud (° ' '' , N)	Elevación (msnm)	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm) (a)	Precipitación de la temporada de crecimiento (mm) (b)
Ensayo de Progenies	-98° 06' 11''	19° 57' 43''	2,555	13.2	724	574
Área de Colecta	-98 07° 48''	20° 00' 11''	2,894	12.0	795	644

Variable \ Zona	Temperatura media en el mes más frío (°C)	Temperatura mínima promedio (°C)	Temperatura media en el mes más cálido (°C)	Temperatura máxima promedio (°C)	Día juliano de la última helada de primavera
Ensayo de Progenies	10.5	2.6	15.7	23.3	71
Área de Colecta	9.3	1.8	14.4	21.6	78

Variable \ Zona	Día juliano de la primera helada de otoño	Duración del período libre de heladas (días)	Grados-día >5 °C (c)	Grados-día >5 °C acumulados en el período libre de heladas	Relación entre la precipitación de verano y la precipitación total (b/a)
Ensayo de Progenies	312	221	2980	2203	0.7928
Área de Colecta	297	198	2561	1778	0.8101

Variable \ Zona	Índice anual de aridez (\sqrt{c}/a)	Grados-día <0°C (basados en la temperatura media mínima mensual)	Balance de la precipitación de verano (Jul+Ago+Sept)/ (Abr+May+Jun)	Precipitación de		
				Primavera	Verano	Otoño
Ensayo de Progenies	0.075	87	1.56	95	227	68
Área de Colecta	0.064	127	1.61	111	265	72