

MEJORAMIENTO GENÉTICO EN ÁRBOLES FORESTALES COMERCIALES DE MÉXICO

[GENETIC IMPROVEMENT IN COMMERCIAL FOREST TREES OF MEXICO]

Carolina Aurora Ambrocio-Hernández¹, Gerardo Rodríguez-Ortíz^{1§}, Mario Valerio Velasco-García², Adán Hernández-Hernández², José Raymundo Enríquez-del Valle¹, Vicente Arturo Velasco-Velasco¹

¹Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Xoxocotlán, Oaxaca, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias CIR-Pacífico Sur. Campo Experimental Valles Centrales, Oaxaca, México.

[§]Autor para correspondencia (gerardo.rodriguez@voaxaca.tecnm.mx).

RESUMEN

La variación genética es la base para los programas de mejoramiento. Un programa de mejoramiento genético forestal (PMGF) tiene como prioridad la producción de descendencias que expresen en grado mayor las características de interés. Para lograr este objetivo se realiza la selección de individuos fenotípicamente superiores, de los que se colecta semilla para establecer ensayos de progenie/procedencia. Resultante de las pruebas, se identifican las mejores familias que se usan para establecer huertos semilleros cuya finalidad es la producción de germoplasma genéticamente mejorado. El objetivo de la investigación fue realizar un análisis mediante revisión bibliográfica sobre el potencial del mejoramiento genético que tienen especies forestales de *Pinus* comerciales en México. Como resultado se comprobó que en México las técnicas principales de PMGF son la selección de árboles superiores, ensayos de progenie y huertos semilleros, en ensayos de progenie/procedencia las variables que presentan mejores ganancias genéticas y ayudan en la selección temprana de mejores individuos son: altura, diámetro normal y diámetro de copa; como lo demostraron varios estudios, la calidad fenotípica del árbol a nivel individual, dentro de la familia y dentro de la especie es el grado de variabilidad que está dado por la interacción genotipo más ambiente. Además, mencionan que el porcentaje de germinación incrementa desde vivero, junto con la heredabilidad y producción promedio en comparación de los árboles que no llevan tratamientos de PMGF.

Palabras clave: Ensayos de progenie, huertos semilleros, selección y variabilidad fenotípica.

ABSTRACT

Genetic variation is the basis for breeding programs. A forest genetic improvement program (PMGF) aims to produce offspring that express the characteristics of interest to a greater degree. To achieve this objective, the selection of phenotypically superior individuals is carried out, from which seed is collected to establish progeny / provenance tests. As a result of the tests, the best families that are used to establish seed orchards whose purpose is the production of genetically improved germplasm are identified. The main objective of this study was to carry out an analysis through bibliographic review on the potential for genetic improvement that commercial *Pinus* forest species in Mexico. As a result, it was found that in Mexico the main PMGF techniques are the selection of superior trees, progeny trials and seed orchards, in progeny / provenance trials the variables that present better genetic gains and help in the early selection of better individuals are: height, normal diameter and cup diameter. As several studies have shown, the phenotypic quality of the tree at the individual level, within the family and within the species is the degree of variability that is given by the genotype plus environment interaction. They also mention that the germination percentage increases from the nursery, along with the heritability and average production compared to trees that do not carry PMGF treatments.

Index words: Progeny trials, seed orchards, selection and phenotypic variability.

INTRODUCCIÓN

En la mayoría de las plantaciones forestales comerciales en México no se lleva un registro del origen nativo y la calidad del germoplasma utilizado. De manera que no se garantiza la supervivencia de la plantación y producción óptima de la especie. Por otra parte, la actividad forestal a escala mundial ha aumentado debido al incremento de la demanda de madera y productos forestales (Murillo y Badilla, 2004). Al aumentar la demanda por productos forestales, incrementa la presión sobre bosques naturales (Furones y Leal, 2006) y el consumo tiende entonces a favorecer un rápido aumento de producción de madera (Cossalter y Smith, 2003). Los bancos de germoplasma juegan un papel importante en el mundo, pues reúnen información sobre el crecimiento de los árboles y surge la posibilidad de implementar programas de mejoramiento genético, PMG, en que se produzcan descendencias con mayor capacidad de supervivencia en el medio ambiente en que se establezcan (Mas, 2003), con características morfológicas y fisiológicas en promedio superiores a la generación anterior (Ruano, 2003). Las evaluaciones en los primeros años de crecimiento en especies de pino han sido poco estudiadas en México (Sáenz-Romero *et al.*, 1994; Farfán *et al.*, 2002), mientras el mejoramiento de pinos mexicanos ha sido realizado en otros países del mundo (Dvorak *et al.*, 2000).

El objetivo principal de los PMG de especies forestales es la producción de poblaciones de árboles que en conjunto muestren desempeño superior, respecto a la población en que se seleccionaron sus progenitores. Un PMG inicia al recorrer áreas de bosques naturales, en donde se seleccionen árboles fenotípicamente sobresalientes de los que se colecta semilla. Al conjunto de semillas colectadas de un árbol particular se le denomina familia, que se almacena, germina y crece en vivero, evitando se mezclen con representantes de otras familias.

Las plántulas generadas de la germinación de semillas colectadas de cada árbol seleccionado, son cultivadas en condiciones apropiadas de vivero, para asegurar que éstas tengan características que aseguren la supervivencia en campo (Davis y Jacobs, 2005). Por lo que es esencial la evaluación del crecimiento de la planta en esta etapa (White *et al.*, 2007). Entonces, árboles de diversas familias se establecen en campo para realizar los ensayos de procedencia/progenie de acuerdo a un diseño experimental para manejar la heterogeneidad de las varianzas en las correlaciones ambientales, en donde se tienen parcelas con representantes de cada familia que interesa evaluar (Malosetti *et al.*, 2013). Transcurridos varios años, se evalúan varios individuos de cada familia en los diversos ambientes, y los datos de cada característica (altura, diámetro de tallo, etc.) se analizan estadísticamente. Resultante del análisis se obtiene el comportamiento promedio de cada familia en cada característica, pero además del promedio se obtiene la varianza fenotípica en cada característica y debido a que el ensayo consideró evaluar varias familias en diversos ambientes; entonces mediante el análisis estadístico la varianza fenotípica de cada característica se puede desagregar en varianza genética y varianza ambiental (Gauch, 2013).

La estrategia de mejoramiento debe asegurar conservar variabilidad genética (Murillo *et al.*, 2012), que es útil para realizar selección de árboles sobresalientes en siguientes ciclos de selección, importante para incluir la resistencia, adaptabilidad de los árboles a problemas ambientales y reducir endogamia (Namkoong, 1997; Boshier y Amaral, 2004), ya que la variabilidad es limitada en plantaciones sin manejo genético adecuado (Lo *et al.*, 2010; Schuhli y Paludziszyn-Filho, 2010). Entre las variables genéticas, sobresalen las más representativas: la heredabilidad (H) y el coeficiente de variación genético. La heredabilidad se define como el grado de semejanza de progenitores a hijos, dado por una interacción genotipo ambiente y para estimarla se divide la varianza genética aditiva sobre la varianza fenotípica. Ambas son indicadores de variabilidad y en el caso de la H se utiliza para calcular la posible ganancia genética (Resende, 2007; Adewale *et al.*, 2010; Shimelis and Shiringani, 2010).

Finalmente, la intención de estos métodos es la evaluación y elección de los individuos con las variables heredadas de mayor calidad genética a una anticipada edad (Alba-Landa *et al.*, 2007); y entonces usar las familias en el establecimiento de huertos semilleros. Tales huertos semilleros deberán conformar un área compacta y contener una población mínima de 100 individuos, pertenecientes a 20 o más familias, señalizados específicamente mediante un código de identificación. Los individuos de la misma familia deben estar separados mínimo 20 m entre sí, para favorecer el intercambio de genes entre individuos (Cerón y Sahagún, 2005).

ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La organización de la documentación encontrada consta de capítulos fundamentales, la primera es la introducción, donde resalta principios básicos, problemática y la importancia de las técnicas de mejoramiento en especies forestales. El segundo capítulo (desarrollo) explica la base del mejoramiento ante la adaptación y resistencia en los árboles. Se encuentran investigaciones realizadas en México y otros países sobre la selección de árboles plus, ensayos de progenie y huertos semilleros, así como las metodologías y resultados sobre las ganancias genéticas reflejadas en variables morfológicas y fisiológicas de las progenies. Y el último apartado se refiere a las conclusiones.

DESARROLLO

Variabilidad genética y fenotípica

Se entiende por variabilidad genética a la variación de los genes dentro y entre especies. Puede presentarse entre especies, entre poblaciones de la misma especie y entre individuos de la misma población (Glowka *et al.*, 1996). Dentro del individuo la estructura genética refleja el número de alelos intercambiados y este intercambio de genes homogeniza las frecuencias alélicas entre ellas, determinando los efectos de la selección y de la variación genética. El alto flujo de genes genera diversidad en la variabilidad de las poblaciones en determinado ambiente (Balloux and Lugon-Moulin, 2002).

La alta variación genética de las especies forestales es responsable de los procesos de adaptación ante factores ambientales que, a su vez, aseguran la supervivencia a los riesgos a los que se exponen las plantaciones forestales (Alfa *et al.*, 2003). La variabilidad fenotípica y la selección determinan la diferencia entre los individuos selectos y los que no, parámetro importante para evaluar la efectividad de la selección (Quijada, 1980). Los árboles seleccionados son evaluados posteriormente para determinar su calidad genética y generar nuevas técnicas para la siguiente generación (Ipinza, 1998). De esta manera el mejoramiento genético busca del aumento de los alelos favorables en variables de interés para aumentar su calidad. También busca principalmente mantener la variabilidad y diversidad genética (Pires *et al.*, 2011).

El valor que se mide directamente en un árbol es el cambio fenotípico, está determinada por la intensidad de selección, variación de los progenitores y la heredabilidad de una característica deseada. La ganancia genética mide esta variación en términos de cambios generación y por tanto mide la superioridad de la generación actual respecto de la generación parental. La variación genética es la base para los programas de mejoramiento, entre mayor sea la variación, mayor es la posibilidad de obtener ganancia genética. Por ejemplo, en la especie *Pinus patula* se ha determinado que algunas características como rectitud del fuste, densidad de la madera, forma de hojas tienen valores de H relativamente altos, y mayor probabilidad de transmitirse a su siguiente generación. Mientras que, características como ramificación, tienen valores de H relativamente bajos y los niveles de expresión de esta característica puede deberse a factores ambientales y no genéticos (Escobar-Sandoval *et al.*, 2018).

Para determinar ganancias genéticas es importante evaluar la calidad de planta, la cual dependerá de caracteres heredados por los padres, de factores ambientales y de las técnicas utilizadas durante su

crecimiento en vivero (Prieto *et al.*, 2009). Se puede determinar evaluando parámetros morfológicos y fisiológicos, que pueden ser manejados desde vivero (Gomes *et al.*, 2002; Rodríguez, 2008). Las variables morfológicas que se miden para calidad genética incluyen la altura, el diámetro basal del tallo, tamaño, biomasa aérea, el color del follaje y la sanidad, el follaje y la raíz; y fisiológicos como el índice de Dickerson, la concentración de clorofila, tasa fotosintética, potencial hídrico, contenido nutricional, tolerancia a sequía y capacidad de emisión de nuevas raíces (Prieto *et al.*, 2009). Las ganancias genéticas en aquellas variables solo se expresan al máximo nivel si hay un correcto funcionamiento dentro de la planta (Ellsworth y Reich, 1996). Por ejemplo, en contexto español, todas las especies autóctonas de *Pinus* y *Abies*, todas las especies arbóreas de *Quercus* y *Fagus sylvatica* están sujetas a una normativa nacional, en que se establecen rangos de alturas y diámetros de cuello mínimos en función de la edad de las plantas en brizales empleados para ser considerados de calidad (Peñuelas y Ocaña, 2000).

Selección de árboles con fines de mejoramiento genético en el mundo y México

Un PMG forestal tiene como objetivo principal la producción de germoplasma que en promedio exprese en grado mayor características de interés, en comparación a la población de la que se seleccionaron sus progenitores. *Pinus* es el género arbóreo con mayor importancia económica en México, para la obtención de madera y celulosa. Para 1990 la cantidad demandada en promedio de madera industrial fue de 10.1 millones de m³ por año (Masera *et al.*, 1997).

Los programas de selección de especies y mejoramiento, buscan aumentar cuantitativamente la producción (Zobel y Talbert, 1988). La primera etapa en un programa para especies nativas es seleccionar los árboles superiores dentro de bosques naturales (Ledig, 1974). Este grupo de árboles seleccionados de la misma especie con características fenotípicas deseables se llama fuente semillera. La importancia de las fuentes semilleras radica en que, mejoran la calidad de las plantaciones en menor tiempo y a largo plazo pueden constituirse en una base genética para iniciar PMG futuros para especies potenciales (Jara, 1995).

Los árboles se seleccionan al menos a 100 m de distancia uno de otro, a fin de establecer posteriormente ensayos de progenie para su evaluación y posteriormente realizar una selección temprana efectiva (Murillo *et al.*, 2010; Badilla *et al.*, 2002). Algunos investigadores e instituciones que han trabajado en la selección de árboles plus, en especies del género *Pinus* han utilizado diferentes métodos de selección, entre ellos se citan los realizados en México por la empresa PROBOSQUE (1990); Alba *et al.* (1994); Aguilar (1994); Flores (2000); Flores y Vargas (2001); García (2002); Rosales *et al.* (2007), Muñoz *et al.* (2008), entre otros.

La revista Unasylva (2009) resume resultados de una reciente investigación sobre el mejoramiento de la salud de las plantaciones, indicando que los principales programas mundiales de mejoramiento genético de árboles forestales resistente a plagas y enfermedades se realizan en Estados Unidos de América, con la especie *Pino blanco*; en China, con *Eucalyptus*; Europa, con *Pissodes strobi* y Nueva Zelanda, con las especies *Pinus radiata* y *Picea glauca*. En el mismo documento detalla un estudio para evaluar la eficiencia de las investigaciones sobre mejoramiento genético llevada a cabo por la FAO con el Servicio Forestal de Columbia Británica, clasificó las actividades del mejoramiento genético en: 1. grandes programas de mejoramiento genético a plantaciones en huertos semilleros u otros tipos de propágulos; 2. grandes programas de investigación de mejoramiento genético que no han originado aún plantaciones en operación; 3. grandes programas de mejoramiento genético en la identificación de variación genética en ensayos de genética/ procedencia, y 4. ensayos de plántulas de semillas de investigación que han identificado variación genética en la resistencia a frío o sequías (FAO, 2008). En la zona tropical de América funcionan varias cooperativas de mejoramiento de árboles (CAMCORE en América del Norte/Centro/Sur, y actividades de colaboración por países en Centroamérica). Esas cooperativas también se han establecido en las zonas templadas de América Latina, principalmente en Brasil y Chile (Palmberg-Lerche, 1993). Entre algunos de estos tipos de redes pueden mencionarse la Red Agroforestal para América Latina y el Caribe y la Red de Cooperación Técnica en Parques Nacionales, Áreas Protegidas y Vida Silvestre para América Latina y el

Caribe. Esta información fue considerada en un estudio posterior sobre el posible papel de la biotecnología, encargado por la Organización Internacional de las Maderas Tropicales-OIMT (ITTO, 1995).

El sector forestal brasileño es considerado uno de los más desarrollados del mundo. El mejoramiento de árboles ha sido un factor importante en la mejora de la competitividad de las empresas forestales brasileñas, especialmente en la adaptación, la productividad y la calidad de la madera. Los principales géneros en que se ha aplicado mejoramiento genético son *Eucalyptus*, *Pinus*, *Acacia* y *Tectona*. Se han obtenido altas tasas de ganancia genética para la producción volumétrica en *Pinus* por método selectivo, lo cual ha permitido producir árboles con tallos más rectos (Francisco y Vilela, 2011). García-Quintana *et al.*, (2007) realizaron un estudio en Cuba con el objetivo de seleccionar material vegetativo para conservación y mejoramiento de la especie de *Pinus caribaea* var. *caribaea*; encontrando diferencias significativas entre procedencias para las variables altura, diámetro y ramificación, siendo altura y diámetro los de mayor variabilidad.

En otro estudio, se realizaron pruebas de progenie de *Pinus maximinoi* en Brasil, Colombia y Sudáfrica como parte del programa de pruebas CAMCORE, North Carolina State University, incluyó 22 procedencias y 439 familias recolectadas en el sur de México, Guatemala y Honduras. No se presentaron correlaciones genéticas contrarias entre crecimiento y de calidad. Las estimaciones medias de heredabilidad fueron de 0.21 para el diámetro a la altura del pecho, 0.11 para el diámetro de la rama, 0.18 para la rectitud del tallo y 0.21 para la cola de zorro a los 8 años (Washington *et al.*, 2001). En países latinoamericanos como Chile, Colombia y Costa Rica se implementaron tres enfoques cooperativos con el objetivo de desarrollar estrategias para mejoramiento genético y la conservación de los recursos genéticos forestales. En Chile se coordinan esfuerzos en mejoramiento genético en *P. radiata* y *Eucalyptus* importantes en ese país. En Costa Rica se realiza la exploración, conservación, mejoramiento y utilización de recursos genéticos (Gutiérrez *et al.*, 2003).

En países de África y América, se han establecido plantaciones de *P. patula* con árboles mejorados, como el establecimiento de huertos semilleros (Sáenz-Romero *et al.*, 1994; Rebolledo *et al.*, 1999; Valencia y Vargas, 2001). Es una de las especies más plantadas internacionalmente para producción de madera en rollo y material para celulosa (Dvorak *et al.*, 2000); en países de África, Asia, Sudamérica, Nueva Zelanda y Australia han mostrado incrementos volumétricos de 15 m³ ha⁻¹ a 25 m³ ha⁻¹, y en casos excepcionales hasta 36 m³ ha⁻¹ (Wormald, 1975).

En las últimas décadas se han implementado importantes actividades en las plantaciones forestales comerciales, principalmente con las especies eucalipto y melina, donde destacan los estados de Tabasco, Campeche, Chiapas, Veracruz y Oaxaca. Estas plantaciones, que en el periodo 1988-1994 tenían aproximadamente una superficie de 300,000 ha, están enfocadas básicamente a la producción intensiva de madera para cubrir la demanda industrial, las técnicas de PMG permiten mejorar la salud, resistencia y adaptabilidad de las especies (Muller-Starck y Schubert, 2001). En México, en donde actualmente existe poca información de evaluaciones de procedencias, es necesario generar investigación al menos para especies de importancia comercial o industrial (Farfán *et al.*, 2002). *Pinus* es el género más abundante y con gran diversidad y alto porcentaje de endemismos en la variabilidad dentro de coníferas, con casi 46 especies de pino situadas la mayoría en el norte de país, por lo cual son de valiosa importancia ecológica y económica, lo cual representa grandes oportunidades para implementar PMG con mayores posibilidades de éxito (FAO, 2008).

Cornellius (1994), realizó 24 investigaciones en *Pinus* spp., *Eucalyptus* y otras coníferas, con datos que demostraron los efectos de aplicar la selección de árboles plus en PMG, las progenies de individuos seleccionados tuvieron ganancia genética de 15% para crecimiento en altura y crecimiento en diámetro, así como 35% volumen mayor por unidad de área. Así mismo Balcorta y Vargas (2004) reportan que en una plantación comercial de *Gmelina arborea* en Campeche, al sur de México, se determinó variabilidad

fenotípica en ocho variables que representó el 20% en altura y diámetro. Se debió a que utilizaron árboles seleccionados fenotípicamente y a su vez benefició la calidad de la madera. Gutiérrez *et al.* (2016) realizaron un estudio de caso de 30 árboles selectos superiores de caoba provenientes de Quintana Roo, México. Se detectaron incrementos en medidas comerciales, 45.36% en diámetro y 9.9% altura total. Los datos indican que las variables diámetro de copa, diámetro normal y altura total son las más efectivas para la selección de árboles superiores representando casi el 80% de la varianza total.

Bustillos-Aguirre *et al.* (2018) evaluaron diámetro, presencia de ramas, altura y volumen, así como su relación genética con la tasa de crecimiento en una plantación de 7 y 10 años de edad, con 84 familias de polinización libre de *P. patula*, en Puebla. Estimaron heredabilidad y correlaciones genéticas, fenotípicas y edad-edad de las características. La selección entre familias mostró mejoras en la ramificación y mejoró la calidad de la madera pues estas difirieron en el nivel de variación fenotípica y control genético. Se concluyó que las correlaciones fenotípicas deben considerarse en un PMG de la especie. Méndez-Neri *et al.* (2020) realizaron un estudio en dos huertos semilleros (Veracruz y Puebla), cada huerto se estableció con árboles clonados fenotípicamente superiores y seleccionados en su misma área. Mediante marcadores moleculares de microsatélite NZPR1078, NZPR114, NZPR5, PtTX2123, PtTX2146, PtTX3107 y PtTX3127. La variación genética fue alta en los huertos asexuales de *P. patula* con deficiencias moderadas de heterocigotos. Por su parte Delgado *et al.* (2012) también evaluaron los niveles de variación genética en dos áreas semilleras de *P. montezumae* y *P. pseudostrobus* en el estado de Michoacán. Consideraron que no existe ningún efecto importante de hermandad entre los árboles de cada área semillera y que contienen individuos con el acervo genético representativo de los dos taxa.

En un estudio realizado por Zitácuaro y Aparicio (2004) bajo condiciones de vivero de árboles de un año de edad, se evaluó el crecimiento inicial en plántulas de *P. oaxacana* Mirov con nueve familias de tres procedencias. Los resultados mostraron diferencias en el crecimiento inicial de *P. oaxacana* a nivel de familias y procedencias. Asimismo, indicaron que las familias con el mayor crecimiento alcanzaron 42 cm de altura y 8.42 mm de diámetro. Lo anterior demuestra la importancia de seleccionar las características deseables de la misma especie para trabajos de reforestación a nivel región. Acosta *et al.* (2012) compararon y evaluaron la variación de *Swietenia macrophylla* King de tres procedencias de Tabasco, a través de la medición de semillas y los porcentajes de semillas que germinaron en charolas de plástico y con sustrato agrolita para retener agua y nutrientes. Se estimaron los porcentajes de germinación y se encontraron diferencias significativas entre procedencias y entre árboles dentro de procedencias de las semillas. El porcentaje germinativo resultó bajo, entre el 2 y 15.7% de solo dos procedencias, por lo que concluyeron que con este porcentaje de variación se debe desarrollar una estrategia en el uso adecuado de métodos y tratamientos en estas poblaciones.

Rodríguez *et al.* (2008) evaluaron a los 4.5 años después de plantados la supervivencia, el crecimiento y las características de la copa en árboles de nueve procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Nuevo León, México. Se midió, altura total, diámetro a la base del tallo, altura a la primera rama y diámetro de copa. Los árboles de la procedencia Agua Fría tuvieron 136 cm de altura, 3.9 cm de diámetro normal, 64.3 cm de altura de copa, en cuanto al porcentaje de copa y en el área de intercepción lumínica, los árboles procedentes de Agua Fría destacan con el 89.1% y 3.0 m² superiores, respectivamente, a los árboles de la procedencia Santa Anita y Puerto San Juan. Las diferencias obtenidas en las características de la copa estuvieron asociadas a las diferencias en la tasa de crecimiento de las procedencias.

En el caso de Oaxaca, Alfonso-Corrado *et al.* (2014) realizaron un estudio enfocado al manejo silvícola que se da en la diversidad genética en sitios de reforestación y de regeneración natural de *P. patula*, en la Sierra Juárez, Oaxaca. Los resultados obtenidos de diversidad genética fueron altos, y no existieron diferencias significativas entre sitios manejados y de regeneración natural. Se concluyó que la alta densidad de árboles en los sitios actúa como factor que evita la pérdida alélica. Hernández-Hernández *et al.* (2019) evaluaron características de conos: diámetro polar y ecuatorial (mm) y semillas: diámetro polar y ecuatorial

(mm) y peso (g) de *P. patula* var. *longipedunculata*, de fenotipos selectos por comparación de dos procedencias de Oaxaca, y se concluyó que las variables fenotípicas de los árboles seleccionados que demuestran una mejor calidad en las semillas son la altura, diámetro normal, rectitud del fuste y forma de copa regular, así como el buen manejo forestal, en este caso fue San Pedro el Alto. Azamar-Oviedo *et al.* (2000) evaluaron en un ensayo de procedencias-progenies a ocho años de establecido, de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero con el fin de evaluar su crecimiento y desarrollo de seis poblaciones con 54 familias de esa especie, se obtuvieron datos de heredabilidad en sentido estricto y supervivencia, no se encontraron diferencias significativas a nivel de poblaciones y familias. Pero las familias que fueron las de mayor y menor alturas, 9.2 y 6.6 m, y diámetros normales 15.9 y 10.5 cm, diferentes significativamente. Sáenz-Romero *et al.* (2011) recolectaron conos de árboles seleccionados de 13 poblaciones de *P. patula* Schiede *et Chamizo*, los cuales estaban separados por un intervalo altitudinal de aproximadamente 50 m, extrajeron las semillas para ser puestas a germinar, a los seis meses de edad se evaluaron las poblaciones para identificar la interacción genotipo-ambiente se estableció una prueba de procedencia en una casa bajo sombra y el otro en un vivero forestal. En general, la altura promedio de las plántulas en todas las procedencias fue tres veces mayor en Quebec (407.9 mm) que en Ixtlán (134.7 mm), y las medias poblacionales de la altitud, revelaron que la población originada a 2650 m de altitud fue la de mejor crecimiento para la altura de las plántulas.

Estudios de progenie/ procedencia en *Pinus*

La finalidad de los ensayos de procedencias es desarrollar árboles de calidad genética con base en características fenotípicas para la producción de semilla (Cerón y Sahagún, 2005), y cuyas características sean heredadas por las progenies para ser más productivas (Alba, 2007). Los ensayos de progenies son plantaciones en las que se evalúa el crecimiento de las descendencias (progenies) de los árboles progenitores (padres) inicialmente seleccionados (Davis y Jacobs, 2005). Por lo que es esencial la evaluación del crecimiento de su progenie en esta etapa inicial (White *et al.*, 2007), ya que posteriormente se convierten en fuentes semilleras certificadas y de mayor calidad genética (Murillo *et al.*, 2015). También es necesario disponer de prácticas silvícolas y de bases sobre mejoramiento genético, como requisitos para agregar un valor adicional (Yanchuk, 2001).

Argentina, Chile, Brasil, China, Indonesia, Nueva Zelanda, Sudáfrica y Venezuela son algunos países que cuentan con PMG. En México la producción forestal está concentrada especialmente en Durango, Chihuahua, Michoacán, Oaxaca y Jalisco (SEMARNAT, 2003). Algunos países han realizado altas inversiones en plantaciones comerciales, a la vez que se maximiza el rendimiento, el valor genético en el futuro se tornará cada vez más importante mundialmente. El mejoramiento genético se enriquecerá con nuevas especies e híbridos (Ipinza, 1998). A continuación, se describen algunos estudios que se han realizado recientemente de plantaciones comerciales en ensayos de progenie y huertos semilleros en México.

Un claro ejemplo en México, es el estado de Veracruz, donde se establecieron tres ensayos de procedencia/progenie de *Pinus teocote* Schl. *et Cham.* se comparó el porcentaje de prendimiento y se encontraron diferencias significativas entre familias dentro de procedencias. Se comprobó la influencia de los sitios y exposiciones en el comportamiento de familias al existir diferencias significativas entre éstas dentro de sitios (Alba-Landa, *et al.*, 2002). Márquez y Mendizábal (2006) identificaron la procedencia y la progenie con mayor productividad en la región con el objetivo de establecer diferencias en el crecimiento de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de estos ensayos como fuente de información para obtener mayor aprovechamiento, pues se puede mejorar la productividad desde un 15.7 hasta 44.2%, dependiendo del nivel de selección del recurso parental utilizado. Por su parte, Gutiérrez-Valencia *et al.* (2012) encontraron diferencias estadísticas altamente significativas entre procedencias para la altura y el diámetro de las plantas en una evaluación de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. a los dos años de establecidos en campo compuestas por

21 familias de dos procedencias. Alba-Landa *et al.* (2016) establecieron en Veracruz, México una prueba de procedencias/progenie para el mejoramiento genético de *P. greggii*, cuya finalidad fue producir en mayor cantidad y calidad al establecer plantaciones comerciales. A los 23 meses se evaluaron tres procedencias de Querétaro y Veracruz. Las diversas familias tuvieron tamaños promedio 50.93 cm en altura; 7.28 mm de diámetro; 99.76% de prendimiento. Por lo que se seleccionaron familias sobresalientes que aseguren que en el futuro esta plantación tenga la posibilidad de producir semilla con ganancias genéticas superiores de los bosques con esta especie y similar clima.

Huertos semilleros sexuales y asexuales

Un huerto semillero es una plantación con características específicas de clones o progenies obtenidas a partir de árboles selectos fenotípicamente, se clasifican en dos tipos: sexuales y asexuales o clonales. Los huertos semilleros sexuales (HSS) se establecen con ensayos de progenie con semilla de árboles plus (fenotípicamente superiores). Los huertos semilleros asexuales (HSA) son plantaciones a partir de material vegetal procedentes de árboles selectos con características fenotípicas superiores y deben llevar un manejo intensivo de producción. (Hopkins y Huther, 1994). Algunos estudios realizados sobre huertos semilleros se describen a continuación.

Mendizábal *et al.* (1999) obtuvieron resultados al realizar la primera evaluación (un año) de una descendencia de 33 familias de cuatro procedencias en Guatemala y Veracruz, México, de un ensayo de procedencia/progenie de *Pinus oocarpa* Schiede. Evaluaron supervivencia, altura y diámetro, encontrándose una mejor respuesta para supervivencia y altura, mientras que para diámetro no hubo diferencias significativas. Alba-Landa *et al.* (2005) evaluaron un ensayo con *Pinus oaxacana* Mirov en su desarrollo inicial de tres procedencias en Veracruz y Puebla, con el objetivo de estimar la supervivencia de 23 progenies en relación al origen. Los resultados obtenidos mostraron valores altos de supervivencia entre las familias de cada procedencia. La conclusión fue que una familia de Puebla sería la mejor fuente productora de semilla con impacto positivo en programas de reforestación y en establecimiento de plantaciones a nivel regional.

Darwin (2009) realizó una evaluación de procedencias de *P. patula* en Italqui provincia Imbabura, Ecuador. La evaluación se realizó con 27 procedencias de México, Sudáfrica, Zimbabwe, Kenya, Bolivia, Perú y Ecuador, a los 10 y 11 años. Los datos del ensayo de progenie mostraron que las semillas de las diversas familias alcanzaron promedios de porcentaje de germinación de 93.83% y sobrevivencia de 98.51%. También evaluaron la correlación altura-diámetro, a la cual se atribuyen las mayores ganancias genéticas a las familias que tuvieron algún tipo de manejo silviculturales donde se presentaron los casos con porcentajes más altos. Gutiérrez *et al.* (2010) realizaron un ensayo de progenies de *P. greggii* establecido en Coahuila, México. El objetivo fue convertir el ensayo a huerto semillero mediante la aplicación de aclareos silvo-genéticos y selección. Las variables usadas fueron diámetro normal, diámetro basal, diámetro de copa, volumen, altura y diámetro de ramas. La densidad de los árboles mostró valores positivos que se encontraron entre el rango de las densidades ya estudiadas. Por su parte, Mendoza-Hernández *et al.* (2018) evaluaron la variación de características reproductivas de conos y semillas en un huerto semillero sexual de *P. patula* donde mencionan que la variación se debió a la estructura genética de los árboles y a las condiciones ambientales en Acaxochitlán, Hidalgo, México. Demostró que existieron niveles de variación altos en las características reproductivas de *P. patula*, pero el índice bajo de endogamia indicó autofecundación baja.

Dentro del PMG del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) en Argentina Sudamérica, Bulfe y Fernández (2017) llevaron a cabo un estudio de la relación que hay entre anatomía del fuste, densidad de madera y su respuesta en cuatro diferentes progenies de *Pinus taeda* y su reacción con humedad óptima y bajo déficit hídrico. Concluyó que la densidad de la madera es considerada una variable altamente heredable (con una heredabilidad individual en sentido estricto de alrededor de 0.5) y que la humedad óptima

favorece el crecimiento en altura de las progenies mientras que una deficiencia hídrica retarda el crecimiento en altura y diámetro. Bulfe y Fernández (2016) demuestran variables ecofisiológicas (altura, diámetro, potencial hídrico, fotosíntesis) que explican las diferencias de desempeño entre progenies, sin embargo, no se logra determinar la razón por la cual se invierten los patrones de tasa de crecimiento. En un ensayo de polinización abierta realizado por Schenone y Pezzutti (2003) de *P. elliottii* y *P. caribaea* var. *hondurensis* con finalidad comercial productiva establecido en Argentina, se estudiaron las variables de crecimiento: altura total, diámetro a la altura del pecho y volumen. Las progenies híbridas mostraron a los cuatro y siete años de edad, un superior desempeño en diámetro y altura por un 9.73%, superando al testigo de *P. taeda* considerado con excelentes características fenotípicas en la zona.

En un huerto semillero clonal de *Pinus sylvestris* L. ubicado en Turquía se evaluaron 30 clones a los 13, 14 y 15 años de edad. Los resultados fueron: altura promedio 4.80 m, diámetro basal 13.45 cm, número de verticilos 42 y diámetros de copa 3.32 m, la varianza entre clones fue de 4.9% para altura, 7.2% para diámetro, 5.5% para verticilos y 7.8% para diámetros de copa. Concluyendo que solo existieron diferencias significativas entre clones para altura, diámetro y copa, presentándose mayor variación dentro de clones (Sivacioglu *et al.*, 2009). En Chihuahua, México, se evaluó un huerto de *Pinus arizonica* Engelm en el cual se estimó el crecimiento de 42 clones, en las características de altura y diámetro. En altura se obtuvieron promedios de 0.5 a 2.5 m, concluyeron que el crecimiento de los clones en altura puede variar por presencia de plagas o enfermedades en el tallo (Rodríguez, 2013). Para esta misma especie y lugar se estudió un huerto, donde se evaluaron a 22 clones de 9 años. Se obtuvieron promedios de 2.20 m en altura y 8.96 cm de diámetro normal, concluyendo que los individuos con las características mejor adaptadas podrían ser más adelante propagados vegetativamente para obtener mejores resultados (Pérez *et al.*, 2014).

Hernández (2014) evaluó en un huerto semillero asexual la altura y diámetro normal, a los 8 y 9 años de edad, en 83 clones de *P. patula*, en el municipio de Aquixtla, Puebla. Observó la variación de los diámetros que fue de 9.53 a 19 cm y alturas de 5.8 y 9.9 m, siendo la variación en el tamaño de los clones altamente significativa. El estudio permitió considerar que implementar actividades de manejo influye en la calidad de la plantación. Aparicio-Rentería *et al.* (2013) evaluaron un huerto semillero clonal en Veracruz, la supervivencia de los clones de *P. patula* a los siete meses después de su establecimiento en campo. Se realizaron 3,000 injertos mediante la técnica de púa lateral de 100 árboles seleccionados, obteniendo una supervivencia del 70%, concluyendo que los clones con tallos menos vigorosos resisten menos las condiciones adversas del sitio.

CONCLUSIONES

Mediante un análisis crítico se concluyó que las técnicas de mejoramiento genético más aplicadas en México y a nivel internacional son: selección de árboles plus, establecimiento de ensayos de progenie/procedencia y el establecimiento de huertos semilleros. Las cuales se consultaron de 41 revistas diferentes, tesis y libros, siendo las revistas: Foresta Veracruzana, Revista Fitotecnia Mexicana, Madera y Bosques, Revista Mexicana de Ciencias Forestales, Agrociencia, Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y Ambiente y New Forest las que aportaron el mayor número de estudios realizados. La variación genética es la base para los programas de mejoramiento genético forestal, entre mayor es la variación, mayor es la ganancia genética, la cual está dada por la interacción genotipo-ambiente, selección fenotípica de progenitores y el manejo en vivero. Estas ganancias genéticas se ven reflejadas en variables morfológicas y fisiológicas que al ser evaluadas determinan la calidad de la planta como lo son la altura, diámetro normal y diámetro de copa que son las más efectivas. Este proceso representa una gran ventaja ya que gracias a esta evaluación se seleccionan a temprana edad individuos fenotípicamente sobresalientes que se convierten en huertos semilleros proveedores de germoplasma de calidad genética.

LITERATURA CITADA

- Acosta, G.R., L.C. Mendizábal-Hernández, J. Alba-Landa, C.A. Adrete y L.N. de la Cruz. 2012. Variación de semillas y germinación de *Swietenia macrophylla* King de tres procedencias del estado de Tabasco, México. *Forestal Veracruzana* 14(1): 35-42.
- Adewale, B.D., C. Okonji, A.A. Oyekanmi, D.A. Akintobi and C.O. Aremu. 2010. Genotypic variability and stability of some grain yield components of cowpea. *African J. Agr. Res.* 5(9): 874-880.
- Aguilar, S.D. 1994. Establecimiento de un huerto semillero clonal de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en la comunidad indígena de Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. Tesis profesional. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán.
- Alba, L.J. 2007. Movimiento de especies forestales en el estado de Veracruz, México. Doctorado en Recursos Genéticos Forestal, Instituto de Genética Forestal, Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México.
- Alba, L.J., H.L. Mendizábal y R.J. Márquez. 1994. Avances del mejoramiento genético en el estado de Veracruz. Red Mexicana de germoplasma forestal. PRONARE-SEMARNAT. México.
- Alba-Landa, J., E. Ramírez-García y A. Aparicio-Rentería. 2007. Correlación de semillas y plántulas de *Pinus teocote* Schl. Et Cham. de tres procedencias del estado de Veracruz, México. *Forestal Veracruzana* 9(1): 23-27.
- Alba-Landa, J., H.L.C. Mendizábal, E.O. Ramírez-García y M.P. Méndez-Guzmán. 2002. Establecimiento de tres ensayos de progenie/procedencia de *Pinus teocote* Schl K Cham. en el estado de Veracruz, México. *Forestal Veracruzana* 4(2): 17-22.
- Alba-Landa, J., L.C. Mendizábal- Hernández, E.O. Ramírez-García, J. Márquez-Ramírez y H. Cruz-Jiménez. 2016. Establecimiento y evaluación temprana de una prueba de procedencias/ progenie de *Pinus greggii* Engelm. en el progreso, Perote, Veracruz, México. *Forestal Veracruzana* 18(1): 45-54.
- Alba-Landa, J., R.A. Aparicio, F.H. Contreras y G.E.O. Ramírez. 2005. Establecimiento de un ensayo de progenie de *Pinus oaxacana* Mirov en los molinos, municipio de Perote, Veracruz. *Forestal Veracruzana* 7(2): 33-36.
- Alfonso-Corrado, C., J. Campos-Contreras, G. Sánchez-García, A. Monsalvo-Reyes y R. Clark-Tapia. 2014. Manejo forestal y diversidad genética de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl, & Cham, en Sierra Juárez, Oaxaca, Madera y Bosques 20(2): 11-22.
- Alía, R., D. Agúndez, N. Alba, M.S.C. González y A. Soto. 2003. Variabilidad genética y gestión forestal. *Ecosistemas* 7(3): 1-7.
- Aparicio-Rentería, A., H. Viveros-Viveros y V. Rebolledo-Camacho. 2013. Huertos semilleros clonales: una alternativa para los programas de reforestación en Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(20): 90-97. doi: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i20.373>.
- Azamar-Oviedo, M., J. López-Upton, H.J. Vargas y B.A. Plancarte. 2000. Evaluación de un ensayo de procedencias-progenies de *Pinus greggii* y su conversión a huerto semillero. In: 1er Congreso Nacional de Reforestación. Montecillo, Méx. 08-10 nov.
- Badilla, Y., O. Murillo y G. Obando. 2002. Efecto de la zona de vida y la altitud en la mortalidad y adaptabilidad al primer año de especies forestales en la Cordillera Volcánica Central, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26(1): 7-15.
- Balcorta, M. H.C. y H.J.J. Vargas. 2004. Variación fenotípica y selección de árboles en una plantación de melina (*Gmelina arborea* Linn., Roxb.) de tres años de edad. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 10(1): 13-19.
- Balloux, F. and N. Lugon-Moulin. 2002. The estimation of population differentiation with microsatellite markers. *Mol. Ecol.* 11: 155-165.
- Boshier, D. y W. Amaral. 2004. Amenazas a los ecosistemas silvícolas y desafíos para la conservación y uso sostenible de los recursos genéticos silvícolas. En: Vinceti, B.; Amaral, W.; Meilleur, B. (eds.) Desafíos de la ordenación de los recursos genéticos silvícolas para contribuir a la subsistencia: ejemplos de Argentina y Brasil. Ed. IPGRI.

- Bulfe, N.M.L. and M.E. Fernández. 2016. Morphophysiological response to drought of *Pinus taeda* L. genotypes of contrasting in mean growth rate. *New Forests* 47: 431-451.
- Bulfe, N.M.L. y M.E. Fernández. 2017. Anatomía funcional del leño juvenil de *Pinus taeda* L: variabilidad genotípica y plasticidad anatómica ante déficit hídrico. *Rev. Fac. Agron.* 116(2): 225-240.
- Bustillos-Aguirre, C.V., J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton y G. Ramírez-Valverde. 2018. Repetibilidad de parámetros genéticos de las características de ramificación en progenies de *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 24(1): e2411131. doi:10.21829/myb.2018.2411131.
- Cerón, R.J. y J. Sahagún. 2005. Un índice de selección basado en componentes principales. *Agrociencia* 39: 667-677.
- Cerón, R.J.J., J. Crossa, C.J. Sahagún, F. Castillo and A. Santacruz. 2006. A Selection index method based on Eigenanalysis. *Crop Science* 46: 1711-1721.
- Cornelius, J. 1994. The effectiveness of plus-tree selection for yield. *Forest Ecology and Management* 67: 23- 34.
- Cossalter, C. and P.C. Smith. 2003. Fast Wood forestry myths and realities. Center for International Forestry Research, Jakarta. 60 p.
- Darwin, V. 2009. Evaluación del comportamiento de procedencias de *Pinus patula* Schlect. et Cham en la Provincia de Imbabura Periodo 2008-2009. Tesis profesional. Universidad Técnica del Norte. Facultad de ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales.
- Davis, A.S. and D.F. Jacobs. 2005. Quantifying root system quality of nursery seedlings and relationship to outplanting performance. *New Forests* 30: 295-311.
- Delgado, V. P., M.J. Núñez, G.M.C. Rocha y F.H. Muñoz. 2012. Variación genética de dos áreas semilleras de *Pino* establecidas en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(18): 104-115.
- Dvorak, W.S., G.R. Hodge, J.E. Kietzka, F. Malán, 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, NCSU. Raleigh, NC.
- Ellsworth, D.S. and P.B. Reich. 1996. Photosynthesis and leaf nitrogen in five Amazonian tree species during early secondary succession. *Ecology* (77): 581-594.
- Escobar-Sandoval, M.C., J.J. Vargas-Hernández, J. López-Upton, S. Espinosa-Zaragoza y A. Borja-de la Rosa. 2018. Parámetros genéticos de calidad de madera, crecimiento y ramificación en *Pinus patula*. *Madera y Bosques* 24(2): e2421595, DOI: 10.21829/myb.2018.2421595.
- Farfán, V.E.G., M.J. Jasso, U.L. López, H.J.J. Vargas y H.C. Ramírez. 2002. Parámetros genéticos y eficiencia a la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Rev. Fitotec. Mex.* 25: 239-246.
- Flores, L.C. 2000. Selección de árboles superiores en el estado de Chihuahua. En: Primer Congreso Nacional de Reforestación. PRONARE-SEMARNAT. México.
- Flores, L.C. y H.J. Vargas. 2001. Características de árboles selectos de *Pinus herrerae* Martínez en Chihuahua. En: Primer Congreso Nacional de Reforestación. PRONARE-SEMARNAT. México.
- Francisco, A. T. and R.M.D. Vilela. 2011. Genetic improvement of forest tree species. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 1: 44-49.
- Furones, F.L. y L. Leal. 2006. Bosques y sociedad en países en desarrollo. Centro Tecnológico Forestal de Catalunya, Solsona. Cataluña, España.
- García, F.G. 2002. El mejoramiento genético forestal y nuestra experiencia con *Pinus douglasiana*. Programa para el Desarrollo Forestal del estado de Jalisco (PRODEFO).
- García-Quintana, Y., A. Álvarez-Brito y E. Guízar-Nolazco. 2007. Ensayo de procedencias de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en alturas de pizarras, viñales, Pinar del Río, Cuba. Chapingo, Estado de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 13(2): 125-129.
- Gauch, H.G. 2013. A Simple Protocol for AMMI Analysis of Yield Trials. *Crop Science*: (in press).
- Glowka, L., F. Burhenne-Guilmin y H. Synge. 1996. Guía del Convenio sobre Diversidad Biológica. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales. *Environment Policy and Law Paper* 30. 179 p.

- Gomes, J.M., L. Couto, H.G. Leite, A. Xavier y S.L.R. García. 2002. Parámetros morfológicas en la evaluación de semilla de *Eucalyptus grandis*. *Árvore* 26: 655-664.
- Gutiérrez, B., P. Quintero, V. Nieto y O. Murillo. 2003. Enfoque cooperativo para el mejoramiento genético y la conservación de los recursos forestales en Chile, Colombia y Costa Rica. *Investigación Agraria. Sistema y Recursos Forestales* 12: 111-122.
- Gutiérrez, V.B.N., O.E.H. Cornejo, G.A. Zermeño, M.S. Valencia y V.R. Mendoza. 2010. Conversión de un ensayo de progenies de *Pinus greggii* var. *greggii* a huerto semillero mediante eigen-análisis. *Bosque* 31(1): 45-52.
- Gutiérrez, V.B.N., O.E. Cornejo, S.B. Rodríguez, U.J. López, V.M.H. Gutiérrez, C.M. Gómez y M.A. Flores. 2016. Selección de árboles sobresalientes de caoba (*Swietenia macrophylla* King.) en un rodal natural mediante métodos multivariados. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 7(37): 51-63.
- Gutiérrez-Valencia, M., L.C. Mendizábal-Hernández, J. Alba-Landa, J. Márquez-Ramírez y H. Cruz-Jiménez. 2012. Evaluación de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus greggii* Engelm. establecida en Villa Aldama, Veracruz, México. *Forestal Veracruzana* 14(2): 25-30.
- Hernández, Z.O. 2014. Evaluación fenológica y análisis de la producción de conos de *Pinus patula* en un huerto semillero asexual. Tesis Maestro en Ciencias. COLPOS. Montecillo, Texcoco, México.
- Hernández-Hernández, A., M.A. Reyes-Reyes, G. Rodríguez-Ortiz, J.R. Enríquez del Valle, M. Gómez-Cárdenas y V.A. Velasco-Velasco. 2019. Conos y semillas de fenotipos selectos de *Pinus patula* var. *longipedunculata* de procedencias de Oaxaca, México. *Revista Mexicana de Agroecosistemas* 6(2): 157-167.
- Hopkins, E.R. and T.B. Huther. 1994. Improvement of *Pinus Pinaster* Ait. in western Australia. CALMS Cience 1: 159-242.
- International Tropical Timber Organization (ITTO). 1995. La biotecnología y la producción sostenible de la madera tropical. Informe Previo del Proyecto OIMT 42/97(F). Organización Internacional de Madera Tropical, 20a Reunión del Consejo de OIMT, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia 21-29 de mayo de 1997.
- Ipinza, R.H. 1998. Mejoramiento genético forestal. In: Programa CONIF Ministerio de agricultura sobre Investigaciones en semillas de especies forestales nativas. INSEFOR. Santa Fe de Bogotá, Colombia.
- Jara, L. 1995. Identificación y selección de fuentes semilleras. En: Identificación, Selección y Manejo de Fuentes Semilleras. Conif, Bogotá. Serie Técnica 32. 156 p.
- Ledig, F.T. 1974. Analysis of methods for the selection of trees from wild stand. *Forest Science* 20: 2-16.
- Ledig, F.T., M. Capó-Arteaga, P.D. Hodgskiss, H. Sbay, C. Flores-López, M.T. Conkle and B. Bermejo-Velázquez. 2001. Genetic diversity and mating system of a rare Mexican piñon, *Pinus pinceana*, and a comparison with *Pinus maximartinezii* (Pinaceae). *American Journal of Botany* 88: 1977-1987.
- Lo, E., S. Stefanovi, K. Ritland and T. Dickinson. 2010. Fine-scale comparisons of genetic variability in seed families of asexually and sexually reproducing *Crataegus* (Hawthorn; Rosaceae). *Am. J. Bot.* 97(6): 1014-1024.
- Malosetti, M., J.M. Ribaut and F. van Eeuwijk. 2013. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. *Frontiers in Physiology* 4(44): 1-17. <https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00044>
- Márquez, R.J. y H.L.C. Mendizábal. 2006. Producción de una prueba de procedencias/progenie de *Pinus caribea* Mor. var. *hondurensis* Barr y Golf a los cinco años. *Forestal Veracruzana* 8(2): 13-18.
- Mas, P.J. 2003. Guía práctica para la producción de planta en un vivero. Comisión Forestal del Estado. Morelia, Mich. México. Boletín Técnico 5. 37 p.
- Masera, O.R., M.J. Ordóñez y R. Dirzo. 1997. Carbon emissions from Mexican forests: Current situation and long-term scenarios. *Climatic Change* 35(3): 265-295. doi: 10.1023/A:100530.
- Méndez-Neri, M., C. Ramírez-Herrera, H.J.J. Vargas, T. Martínez-Trinidad, J. López-Upton y P. Antonio-López. 2020. Diversidad genética en dos huertos semilleros de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. et Cham, Rev. Fitotec. Mex. 43(1): 113-119. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.1.113>

- Mendizábal, H.L., L.J. Alba y C.V. Rebollo. 1999. Prueba de procedencias/progenie de *Pinus oocarpa* Schiede en el municipio de E. Zapata, Veracruz, México. *Forestal Veracruzana* 1(2): 9-12.
- Mendoza-Hernández, N.B., C. Ramírez-Herrera, J. López-Upton, V. Reyes-Hernández y L.P. Antonio. 2018. Variación de características reproductivas de árboles de *Pinus patula* en un huerto semillero sexual. *Agrociencia* 52: 279-291.
- Muller-Starck, G. y R. Schubert. 2001. Genetic responses of forest systems to changing environmental conditions. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Muñoz, F.H.J., B.R. Toledo, R.T. Sáenz, F.J. Villaseñor, S.J.J. García y M.J.J. García. 2008. Establecimiento y manejo de dos áreas semilleras de coníferas nativas en el estado de Michoacán. *Cien. For. en Méx.* 33(103): 79-102.
- Murillo, O. e Y. Badilla. 2004. Evaluación de la calidad y estimación del valor en pie de la plantación forestal. Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR. Cartago, Costa Rica.
- Murillo, O. y V. Guevara. 2013. Estado de los recursos genéticos forestales de Costa Rica. MINAET/FAO/CONAGEBIO. San José, Costa Rica.
- Murillo, O., G. Obando, Y. Badilla y E. Araya. 2010. Estrategia de mejoramiento genético para el Programa de Conservación y Mejoramiento Genético de Especies Forestales del ITCR/Fundecor, Costa Rica. *Revista Forestal Latinoamericana* 16(30): 275-285.
- Murillo, O., M. Espitia y C. Castillo. 2012. Fuentes semilleras para la producción forestal. Universidad de Córdoba. Ed. Damar S.A.S (Bogotá).
- Murillo, O., Y. Badilla, F. Rojas, G. Córdoba, D. Carvajal y R. Canessa. 2015. Cultivo de especies maderables nativas de alto valor para pequeños y medianos productores (Informe final proyecto de investigación). Instituto Tecnológico de Costa Rica: Cartago, Costa Rica.
- Namkoong, G. 1997. A gene conservation plan for loblolly pine. *Canadian J. Forest Res.* 27(3): 433-437.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 2007. Conservación y manejo de recursos genéticos forestales. Vol. 3: en plantaciones y bancos de germoplasma (ex situ). FLD, Bioversity International Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, Roma, Italia.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2008. Selection and breeding for insect and disease resistance. Fecha de consulta: 12-mayo-2022) <https://www.fao.org/forestry/26462/en/>.
- Palmberg-Lerche, C. 1993. Present status of forest plantations and tree improvement in the Americas, with special reference to Tropical America. Congress and Seventh Brazilian Forestry Congress. Curitiba, Brasil. First Pan-American Forestry 3: 142-149.
- Peñuelas, R.J.L. y B.L. Ocaña. 2000. Cultivo de plantas forestales en contenedor, 2^a Edición. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Pérez, A., M. Pompa-García, R. Solís y J. Chacón. 2014. Dinámica dasométrica del huerto clonal de *Pinus arizonica* en los bosques del sur de Chihuahua. In Ciencias Agropecuarias Handbook T-II: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos ECORFAN. pp. 104-112.
- Pires, I. E., M.D.V. Resende, R.L. Da Silva y M.F. Resende Jr. 2011. Genética florestal. Vicens. Ed. Arka.
- Prieto, R.J.A., R.J.L. García, B.J.M. Mejía, A.S. Huchin y V.J.L. Aguilar. 2009. Producción de plántula del género *Pinus* en vivero del clima templado frío. Publicación Especial N° 28. Campo Experimental Valle del Guadiana, INIFAP-SAGARPA. México.
- Programa Internacional para el Mejoramiento Genético y Conservación de Especies Forestales (CAMCORE) 2007. Boletín de noticias CAMCORE para México y Centroamérica, 1(2): 6.
- Protectora de Bosques (PROBOSQUE). 1990. Plantaciones forestales en el estado de México. Información técnica. Editorial forestal XXI. Consultado: 30-enero-2022. <http://www.phcmexico.com.mx/phcplantaciones.html>.
- Quijada, M. 1980. Selección de árboles forestales. In: Mejora de árboles forestales. Informe sobre el curso de capacitación FAO/ DANIDA sobre mejora genética de árboles forestales en Mérida, Venezuela. Estudio FAO-MONTES 20: 169-176.
- Radke, P. and A. Radke. 2004. Plantation improvement using clonal propagation - an overview of the latest technology in Australia. With an appendix on: Variation in tree species, and improvement and

- propagation options - an explanation. In: Proceedings of Prospects for highvalue hardwood timber plantations in the dry tropics of Northern Australia, Mareeba.
- Rebolledo, C.V., H.L.C. Mendizábal y L.J. Alba. 1999. Evaluación de familias comunes de *Pinus patula* Schl. Et Cham. en dos ensayos de progenie. *Forestal Veracruzana* 1: 19-24.
- Resende, M. 2007. Matemática y estadística para análisis de experimentos de mejoramiento genético. EMBRAPA, Florestas. 32 p.
- Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales (Unasylva) 2009. Adaptación al cambio climático. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales 60(231/232): 50-56.
- Rodríguez, L.R., M.S. Valencia, R.J. Meza, A.M.A. Capó y P.A. Reynoso. 2008. Crecimiento y características de la copa de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. en Galeana, Nuevo León. *Rev. Fitotec. Mex.* 31(1): 19-26.
- Rodríguez, T.D.A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Universidad Autónoma Chapingo. Mundi Prensa. México.
- Rodríguez, V.J. 2013. Establecimiento y evaluación de huerto semillero clonal de *Pinus arizonica* Engelm. en el ejido el Largo y anexos, Madera, Chihuahua. Tesis de Ingeniería forestal. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, División de Agronomía, Departamento Forestal. Saltillo, Coahuila, México.
- Rosales, C.R., F.H.J. Muñoz, R.F. Villaseñor, R.J.T. Sáenz y S.J.J. García. 2007. Selección de árboles superiores de *Pinus pseudostrobus* Lindl., con el sistema árboles testigo en áreas semilleras de Michoacán. In: VIII Congreso Mexicano de Recursos Forestales. Morelia, Michoacán. México.
- Rankham, R. 2003. Genetics and conservation biology. *Comptes Rendus Biologies* 326: 22-29.
- Ruano, M.J.R. 2003. Viveros Forestales, Manual de cultivo y proyectos. Ed. Mundi Prensa. Madrid, España. 281 p.
- Sáenz, R.C. y B.A Plancarte. 1991. Metodología para el establecimiento y evaluación de ensayos de progenies en especies forestales. Serie de Apoyo Académico No. 46. División de Ciencias Forestales. Chapingo. México.
- Sáenz-Romero, C. 2004. Zonificación estatal y altitudinal para la colecta y movimiento de semillas de coníferas en México. Manejo de Recursos Genéticos Forestales. Segunda edición. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. pp. 72- 86.
- Sáenz-Romero, C., H. Nienstaedt and J.J. Vargas-Hernández. 1994. Performance of *Pinus patula* genotypes selected in South Africa and growing in their native Mexican environment. *Silvae Genet.* 43: 73-81.
- Sáenz-Romero, C., L.F. Ruiz-Talonja, B.N.M. Sánchez-Vargas and G.E. Rehfeldt. 2011. Genetic variation among *Pinus patula* populations along an altitudinal gradient. Two environment nursery tests. *Rev. Fitotec. Mex.* 34(1): 19-25.
- Schenone, R.A. y R.V. Pezzutti. 2003. Productividad de progenies de *Pinus elliottii* y *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. Paper submitted to the XII World Forestry Congress, 2003, Quebec City, Canadá.
- Schuhli, G. y E. Paludzyszyn-Filho. 2010. Escenario de silvicultura de teca y perspectivas para el mejoramiento genético. *Pesq. Florestal Bras.* Colombo 30(63): 217-230.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2003. Anuario estadístico de la producción forestal 2003. SEMARNAT, México.
- Shimelis, H. y R. Shirngani. 2010. Variance components and heritabilities of yield and agronomic traits among cowpea genotypes. *Euphytica* 176(3): 383-389.
- Sivacioglu, A., S. Ayan and D.A. Çelik. 2009. Clonal variation in growth, flowering and cone production in a seed orchard of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in Turkey. *African Journal of Biotechnology* 8(17): 4084-4093.
- Valencia, M.S. y H.J.J. Vargas. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultanea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. *Agrociencia* 35: 109-120.
- Washington, J.G., G.R. Hodge and W.S. Dvorak. 2001. Genetic parameters and provenance variation of *Pinus maximinoi* in Brazil, Colombia and South Africa. *Forest Genetics* 8(2): 159-170.

- White, T.L., T.W. Adams and D.B. Neale. 2007. Forest Genetics. CAB Int., Oxford. 682 p.
- Willan, R.L. 1988. Economic returns from tree improvement in tropical and subtropical conditions. Technical Note. Danida Forest Seed Centre 36-38.
- Wormald, T.J. 1975. *Pinus patula*. Tropical Forestry Paper No. 7. Tropical Forestry Institute. Commonwealth Forestry Institute. Oxford, England. 172 p.
- Yanchuk, A.D. 2001. The role and implications of biotechnological tools in forestry. *Unasylva* 204(52): 53-61.
- Zitácuaro, C.F.H. y R.A. Aparicio. 2004. Variación de altura y diámetro de plántulas de *Pinus oaxacana* Mirov de tres poblaciones de México. *Forest Veracruzana* 6(1): 21-26.
- Zobel, B.J. y J.P. Talbert. 1988. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Ed. Limusa. México. Applied Forest Tree Improvement. John Wiley y Sons, New York. USA.