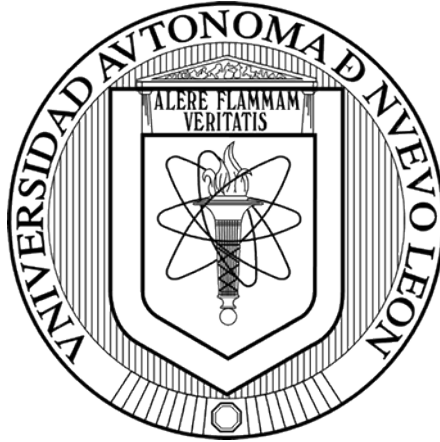


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**



**TESIS**

**INTERACCIÓN Y COMPATIBILIDAD DE DIFERENTES MÉTODOS  
DE INJERTADO EN PATRONES DE *Pinus pseudostrobus* Lindl.**

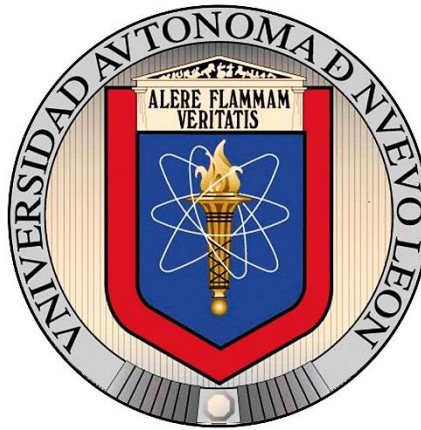
**POR**

**M.C. RUBÉN BARRERA RAMÍREZ**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**JUNIO, 2020**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO**



**TESIS**

**INTERACCIÓN Y COMPATIBILIDAD DE DIFERENTES MÉTODOS  
DE INJERTADO EN PATRONES DE *Pinus pseudostrobus* Lindl.**

**POR**

**M.C. RUBÉN BARRERA RAMÍREZ**

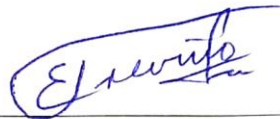
**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTOR EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MANEJO DE  
RECURSOS NATURALES**

**LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

**JUNIO, 2020.**

# INTERACCIÓN Y COMPATIBILIDAD DE DIFERENTES MÉTODOS DE INJERTADO EN PATRONES DE *Pinus pseudostrobus* Lindl.

## APROBACIÓN DE TESIS



---

Dr. Eduardo Javier Treviño Garza  
Director



---

Dr. Marco Aurelio González Tagle  
Codirector



---

Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón  
Asesor



---

Dr. Ricardo López Aguillón  
Asesor



---

Dr. J. Jesús Vargas Hernández  
Codirector externo

Manifiesto de originalidad:

Manifiesto que la presente investigación es original y fue desarrollada para obtener el grado de Doctor en Ciencias con Especialidad en Manejo de Recursos Naturales, donde se utiliza información de otros autores, se otorgan los créditos correspondientes.

Rubén Barrera Ramírez

Junio, 2020

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo manifestar mi sincero agradecimiento a las siguientes instituciones y personas:

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otorgarme el apoyo económico para la realización de mis estudios de doctorado.

Al personal docente y administrativo de Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León, por todas sus atenciones y por la oportunidad brindada para realizar mis estudios.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), a través del Campo Experimental Uruapan, Michoacán, por brindarme el apoyo necesario para realizar el presente trabajo.

Al Dr. Eduardo Javier Treviño Garza, por su dirección en este trabajo de tesis, la atención y apoyo brindados, y sobre todo por su sincera amistad.

Al Dr. Marco Aurelio González Tagle, por su colaboración y apoyo para la realización del presente trabajo.

Al Dr. Oscar Alberto Aguirre Calderón, por la asesoría brindada en este trabajo ya que sus indicaciones y sugerencias fueron de gran ayuda.

Al Dr. Ricardo López Aguillón, por su disponibilidad, recomendaciones y atención, mostradas durante la elaboración de este trabajo, pero, sobre todo por su amistad.

Al Dr. J. Jesús Vargas Hernández, por su atención, sus contribuciones, asesorías y dirección brindada, para que este trabajo concluyera de la mejor manera.

Al Dr. Martin Gómez Cárdenas investigador titular del Campo Experimental Uruapan del INIFAP, por el apoyo y las facilidades brindadas durante la realización del presente trabajo.

Al Ing. H. Jesús Muñoz Flores investigador titular del Campo Experimental Uruapan del INIFAP, por su amistad, disposición y las facilidades brindadas para la realización de este trabajo.

Al Sr. Sergio Cárdenas Morales, por compartir su experiencia como injertador durante la realización de este trabajo.

Al Sr. Gabriel García Alcaraz, por su amistad y apoyo durante la toma de datos.

A todas aquellas personas que de una manera u otra me ayudaron durante mi formación académica y que también participaron en la realización de este trabajo.

A mis amigos. Que a lo largo de mi formación han estado ahí apoyándome y por la amistad que nos une.

¡Gracias!

## DEDICATORIA

Al motor de mi vida, mis hijos Carlos David, Ailed Maricruz y Leonardo, y también a mi esposa Dellanira, con infinito amor por acompañarme siempre en las buenas y en las malas, por ser el motor que me empuja a seguir luchando y avanzando día con día, por el apoyo, la paciencia, pero, sobre todo por su cariño, amor y el respeto que nos une (Gracias familia).

### *A MIS PADRES:*

Juana Ramírez Cruz y Ángel Barrera González con infinito amor y gratitud por haberme brindado su cariño, apoyo y consejo durante toda mi vida y formación profesional.

A mi madre por enseñarme a ser humilde en la vida, a nunca desistir, por sus consejos y por su inmenso cariño y apoyo en mi vida como estudiante y como hijo (Gracias mamá).

A mi padre por ser ejemplo, gracias a él aprendí a ser constante y valiente en los buenos y malos momentos y a nunca darme por vencido, y siempre luchar por las cosas que quiero (Gracias papá).

### *A MIS HERMANOS:*

Saúl, Lourdes, Miguel Ángel y María del Rosario. Para que nuestros propósitos se vean realizados y siempre luchemos por alcanzar nuestras metas.

Y a todos mis seres queridos, que a lo largo de mi formación personal han estado ahí para apoyarme en cualquier momento.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	iii
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación .....	6
1.2. Hipótesis.....	7
1.3. Objetivos .....	8
1.3.1. Objetivo general .....	8
1.3.2. Objetivos específicos.....	8
1.4. Antecedentes.....	9
1.4.1. Modelos de distribución potencial de especies forestales .....	9
1.4.2. Mejoramiento genético forestal .....	10
1.4.3. Establecimiento de huertos semilleros.....	12
1.4.4. Propagación vegetativa a través de injertos .....	13
1.4.5. Métodos de injertado en pino.....	14
1.4.6. Factores involucrados en el éxito del injerto .....	16
Bibliografía .....	18
<b>CAPÍTULO II. Áreas óptimas con potencial para el establecimiento de unidades productoras de germoplasma forestal con dos variedades de <i>Pinus pseudostrabus</i>. .....</b>	<b>28</b>
Resumen .....	28
Abstract .....	29
2.1. Introducción .....	30
2.2. Materiales y métodos .....	32
2.2.1. Obtención de los datos de presencia .....	33
2.2.2. Variables predictoras .....	34
2.2.3. Delimitación del área accesible (símbolo M) .....	36
2.2.4. Generación del modelo .....	36



2.2.5. Validación del modelo .....	37
2.2.6. Distribución potencial actual .....	37
2.2.7. Áreas óptimas para el establecimiento de UPGF y selección de los mejores individuos .....	38
2.3. Resultados y discusión .....	38
2.3.1. Distribución potencial actual .....	38
2.3.2. Áreas óptimas para el establecimiento de UPGF y selección de los mejores individuos .....	45
2.4. Conclusiones.....	48
Bibliografía .....	49
<b>CAPÍTULO III. Influencia de algunos factores en el crecimiento y supervivencia en injertos de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. oaxacana (Mirov) Harrison.</b> .....	54
Resumen .....	54
Abstract .....	55
3.1. Introducción .....	56
3.2. Materiales y métodos .....	59
3.2.1. Origen y preparación de los portainjertos .....	59
3.2.2. Recolección de yemas .....	60
3.2.3. Método de injertado .....	61
3.2.4. Época de injertado .....	64
3.2.5. Variables evaluadas .....	65
3.2.6. Diseño experimental y análisis estadístico .....	66
3.3. Resultados y discusión .....	68
3.3.1. Prendimiento del injerto (PI) .....	68
3.3.2. Crecimiento del brote (Cb) .....	71
3.3.3. Supervivencia de los injertos .....	72
3.4. Conclusiones .....	75
Bibliografía .....	76

<b>CAPÍTULO IV. Interacción y compatibilidad de yemas y patrones en injertos recíprocos de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>oaxacana</i> y <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i>.</b> .....	82
Resumen .....	82
Abstract .....	83
4.1. Introducción .....	84
4.2. Materiales y métodos .....	87
4.2.1. Origen y preparación de los portainjertos .....	87
4.2.2. Obtención de las yemas .....	88
4.2.3. Método de injertado .....	89
4.2.4. Combinaciones de injertos por nivel de afinidad .....	91
4.2.5. Variables evaluadas .....	92
4.2.6. Diseño experimental y análisis estadístico .....	93
4.3. Resultados y discusión .....	95
4.3.1. Prendimiento del injerto (PI) .....	95
4.3.2. Crecimiento del brote en injertos vivos (Cb) .....	100
4.3.3. Supervivencia de los injertos .....	104
4.4. Conclusiones .....	108
Bibliografía .....	109

## ÍNDICE DE CUADROS

### Capítulo 2

Cuadro 1. Requerimientos agroecológicos de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i> y <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> .....	33
Cuadro 2. Variables incorporadas en la modelación de la distribución potencial de <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i> y <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> y para la selección de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal en Oaxaca y Michoacán ( $r \geq 0.85$ ) .....	35
Cuadro 3. Valores de las proporciones AUC del análisis de ROC parcial y de Z para los dos mejores modelos de idoneidad en <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i> y <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> .....	39
Cuadro 4. Contribución porcentual de las variables a los modelos generados para <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i> y <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i> de Oaxaca y Michoacán.....	41

### Capítulo 3

Cuadro 5. Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de cuatro factores en el prendimiento (PI) y crecimiento del brote (Cb) de los injertos en <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>oaxacana</i> .....	68
Cuadro 6. Comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) del prendimiento y crecimiento del brote para injertos realizados en <i>P. pseudostrobus</i> var. <i>oaxacana</i> .....	71

Cuadro 7. Dinámica del porcentaje de supervivencia de los tipos de injerto en <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana realizados en distintas épocas del año.....	72
---	----

#### Capítulo 4

Cuadro 8. Procedencia de la semilla para producir la planta portainjerto de <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	87
Cuadro 9. Combinaciones posibles para cada nivel de afinidad entre progenies selectas de árboles superiores de <i>Pinus pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	92
Cuadro 10. Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de tres factores de compatibilidad en el prendimiento (PI) en injertos recíprocos de <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	96
Cuadro 11. Comparación de media de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para el prendimiento del injerto (PI) entre los niveles de interacción y afinidad en injertos recíprocos de <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	97
Cuadro 12. Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de tres factores de compatibilidad en el crecimiento del brote (Cb) en injertos recíprocos de <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	100
Cuadro 13. Comparación de media de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para el crecimiento del brote (Cb) entre los niveles de interacción y afinidad en injertos recíprocos de <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana y <i>P. pseudostrobus</i> var. pseudostrobus.....	102

# ÍNDICE DE FIGURAS

## Capítulo 1

- Figura 1. Principales métodos de injertados en pinos. A) injerto de enchapado lateral y B) Injerto de fisura terminal (Foto: Propia) ... 15

## Capítulo 2

- Figura 2. Distribución natural de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en Michoacán y Oaxaca, México. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, registros propios y del Sistema Biométrico Forestal..... 32
- Figura 3. Distribución potencial de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, en una porción del Eje Neovolcánico y de la Sierra Madre del Sur en Michoacán y Oaxaca, respectivamente..... 40
- Figura 4. Áreas con potencial óptimo para el establecimiento de UPGF con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*..... 46

## Capítulo 3

- Figura 5. Características de la planta portainjerto producida con tres diferentes dosis de fertilización; 3, 5 y 8 kg de Multicote® 15-7-15+2MgO + micronutrientes (listones de color naranja, amarillo y blanco, respectivamente) en el CE. Uruapan, INIFAP..... 60
- Figura 6. Colecta de yemas terminales de árboles selectos de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* para su posterior injertado. a) árboles donadores, b) selección y etiquetado de yemas, c) preparación y acomodo de yemas, d) recubierta de yemas para su transporte, y e) dimensiones promedio de las yemas recolectadas. .... 61

Figura 7. Etapas del injerto de fisura terminal realizado en <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana. a) corte de brote líder del portainjerto, b) corte vertical central al portainjerto, c) preparación de la yema, d) unión del injerto, e) recubrimiento del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan, y g) colocación de etiqueta y bolsa de papel estraza.....	62
Figura 8. Etapas del injerto de enchapado lateral realizado en <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana. a) limpieza a la base del portainjerto, b) corte de lengüeta en portainjerto, c) preparación de la yema para injertar, d) corte paralelo del portainjerto, e) recubrimiento y amarre del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan y colocación de etiqueta y bolsa de papel estraza.....	64
Figura 9. Prendimiento en injertos terminales y laterales en <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana. a) injerto muerto, b). injerto con prendimiento y crecimiento del brote y c) injerto prendido sin crecimiento.....	65
Figura 10. Efecto de las interacciones: procedencia de la yema-época de injertado (a) y procedencia de la yema-tipo de injerto (b), en el prendimiento de los injertos en <i>Pinus pseudostrobus</i> var. oaxacana (líneas indican error estándar) .....	70
Figura 11. Supervivencia estimada con el modelo de Kaplan-Meier para injertos de enchapado lateral (izquierda) y fisura terminal (derecha) en <i>P. pseudostrobus</i> var. oaxacana. Valores con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) .....	73

## Capítulo 4

- Figura 12. Características de la planta portainjerto de *P. pseudostrobus* var. oaxacana y var. *pseudostrobus* producida en el CE. Uruapan, INIFAP. a) trasplante, b) mantenimiento y c) portainjerto de ambas variedades a 1.5 años..... 88
- Figura 13. Etapas del injerto de fisura terminal realizado en ambas variedades de *P. pseudostrobus*. a) corte de brote líder del portainjerto, b) corte vertical central al portainjerto, c) preparación de la yema, d) unión del injerto, e) recubrimiento del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan, y g) colocación de etiqueta y bolsa de papel estraza..... 90
- Figura 14. Supervivencia estimada con el modelo de Kaplan-Meier para injertos recíprocos realizados en distintos niveles de interacción y afinidad con *P. pseudostrobus* var. oaxacana y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*. Valores con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con las pruebas de Chi<sup>2</sup> y Tukey ( $p \leq 0.05$ )..... 104
- Figura 15. Injertos recíprocos vivos y con presencia de compatibilidad, realizados en tres niveles de afinidad con *P. pseudostrobus* var. oaxacana y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*. a) homoinjertos de la var. *pseudostrobus*, b) homoinjertos de la var. oaxacana, c) injerto intraespecífico con la var. *pseudostrobus*, d) injerto intraespecífico de la var. oaxacana, e) injerto intervarietal de la var. oaxacana x var. *pseudostrobus* (portainjerto/yema) y f) síntomas de incompatibilidad temprana..... 105

## RESUMEN

La propagación vegetativa mediante injerto permite multiplicar íntegramente las características fenotípicas y genotípicas de árboles genéticamente superiores, para establecer huertos que produzcan semilla de alta calidad genética; sin embargo, previamente se debe disponer de información acerca de la distribución potencial de la especie de interés. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue determinar la distribución potencial de dos variedades de *P. pseudostrobus* para proponer áreas más pequeñas que permitan seleccionar individuos genéticamente superiores y evaluar la respuesta de técnicas de propagación vegetativa basada en métodos de injertado entre poblaciones naturales y variedades de esta especie. Se probaron 10 modelos para conocer la distribución actual y potencial de ambas variedades de *P. pseudostrobus*, y proponer áreas óptimas con posibilidad para localizar individuos genéticamente superiores. De diciembre de 2018 a junio de 2019, se realizaron 324 injertos y se probó el efecto de la procedencia de la yema, el tipo de portainjerto, la época y la técnica de injerto. En agosto de 2019 se realizaron 258 injertos recíprocos con ambas variedades, y se determinó la interacción y compatibilidad presente en homoinjertos, injertos intraespecífico e intervarietales. En ambos casos, se determinó el efecto de los factores estudiados, respecto al crecimiento, prendimiento y porcentaje de supervivencia del injerto. Ambas variedades de *P. pseudostrobus* presentaron un área de traslape similar de 72.5%, en una porción de la Sierra Madre del Sur, donde se presentaron áreas de idoneidad alta para el establecimiento de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal y selección de los mejores individuos (989,300 ha); por otra parte, la técnica de injertado, la época de injerto y la procedencia de la yema resultaron ser determinantes en el crecimiento y éxito del injerto (supervivencia >40%, a finales del invierno, con injertos de enchapado lateral); también se determinó que se pueden realizar injertos intervarietales exitosos ( $\geq 50\%$ ) con ambas variedades, siempre y cuando se elijan adecuadamente las yemas y portainjertos.

**Palabras clave:** Distribución potencial, individuos de interés, propagación vegetativa, éxito del injerto, variedades de *P. pseudostrobus*.



## ABSTRACT

Vegetative propagation by grafting allows the phenotypic and genotypic characteristics of genetically superior trees to be fully multiplied, to establish orchards that produce seed of high genetic quality; however, information on the potential distribution of the species of interest must be previously available. Therefore, the objective of this work was to determine the potential distribution of two varieties of *P. pseudostrobus* to propose smaller areas that allow genetically superior individuals to be selected and evaluate the response of vegetative propagation techniques based on grafting methods between natural populations and varieties of this species. Ten models were tested to know the current and potential distribution of both varieties of *P. pseudostrobus*, and to propose optimal areas with the possibility of locating genetically superior individuals. In December 2018 to June 2019, 324 grafts were made and the effect of the origin of the scion, the type of rootstock, the season and the grafting technique were tested. In August 2019, 258 reciprocal grafts were made with both varieties, and the interaction and compatibility present in homograft, intraspecific and intervarietal grafts was determined. In both cases, the effect of the factors studied was determined, with respect to growth, success and percentage of graft survival. Both varieties of *P. pseudostrobus* presented a similar overlap area of 72.5%, in a portion of the Sierra Madre del Sur, where areas of high suitability for the establishment of Forest Germplasm Production Units, and selection of the best individuals (989,300); on the other hand, the grafting technique, the season of grafting and the origin of the scion were decisive in the growth and success of the graft (survival > 40%, in late winter, with lateral plating grafts); It was also determined that successful intervarietal grafts ( $\geq 50\%$ ) can be performed with both varieties, as long as the scion and rootstocks are properly chosen.

**Key words:** Potential distribution, individuals of interest, vegetative propagation, graft success, *P. pseudostrobus* varieties.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En la actualidad el interés en la restauración de los ecosistemas cada vez es mayor debido a la pérdida de biodiversidad, la desertificación y al cambio climático (FAO, 2018 y 2020). Además, las actividades como el manejo forestal inapropiado y el cambio de uso de suelo han reducido poblaciones o eliminado especies con hábitats limitados (Burney *et al.*, 2015); también ha producido mermas y empobrecimiento de su variabilidad genética (FAO, 2012). La recuperación de su potencial productivo se puede lograr a través de técnicas silvícolas y herramientas de mejora genética (Flores *et al.*, 2017 y 2019). El establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) permiten solucionar problemas de baja productividad forestal ya que incrementan la producción maderable más allá de lo que pueden generar los bosques naturales manejados (FAO, 2019). Para que las PFC tengan el éxito deseado es necesario contar con un suministro suficiente de germoplasma que genere plantas de crecimiento superior al de los bosques naturales (Zobel & Talbert 1988). La selección adecuada del material genético recolectado aumenta la supervivencia, producción y rendimiento de las plantaciones (Wang & Kooten, 2018; Flores *et al.*, 2019). Sin embargo, hasta ahora en los programas de PFC en México se han utilizado fuentes de semilla en las que no se considera la calidad genética o el origen de los individuos (CONAFOR, 2019), ya sea por desconocimiento, falta de interés o porque en el proyecto no se consideró un programa de mejora genética que sea viable económicamente (CONAFOR, 2011).

De acuerdo con el Sistema Nacional de Investigación y Gestión Forestal (SNIGF, 2019), la superficie de plantaciones forestales en México sigue siendo pequeña, al cierre del año 2018 se registró el establecimiento de 349.2 mil ha<sup>-1</sup> de las que 222.9 mil ha<sup>-1</sup> pertenecen a PFC maderables, 101.3 mil ha<sup>-1</sup> a plantaciones no maderables y 24.9 mil ha<sup>-1</sup> con plantaciones de doble propósito (conservación y restauración). En el país, existe el interés por desarrollar programas de mejoramiento con especies nativas a través de la selección de individuos genéticamente superiores, la principal finalidad es conservar aquellos individuos mejor adaptados y con el mayor

rendimiento productivo para trabajos de reforestación, restauración y plantaciones comerciales (CAMCORE, 2008; CONAFOR, 2019). Desafortunadamente, la selección de los mejores árboles es una actividad costosa y difícil de realizar (Reynoso-Santos *et al.*, 2018), ya que los mayores costos se presentan durante su localización; una manera de abatirlos es focalizar áreas más pequeñas, conocidas como unidades productoras de germoplasma forestal (UPGF) a través de diferentes herramientas de apoyo y planificación como los modelos de distribución potencial de especies. Dichos modelos son capaces de predecir la presencia de una especie en función de variables ambientales (Soberón, 2010, Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015) y se basan principalmente en correlaciones entre registros de presencia conocidos y sus condiciones ambientales específicas (Osorio-Olvera *et al.*, 2016).

Para modelar la distribución de especies se han desarrollado diferentes técnicas basadas en algoritmos (Singh *et al.*, 2018), y el modelo de máxima entropía (MaxEnt) el más aceptado (Radosavljevic y Anderson, 2014). Este algoritmo estima la distribución de probabilidad de menor sesgo que minimiza la información, sujeta a un conjunto de restricciones basadas en el conocimiento de las condiciones ambientales en los sitios de presencia de una especie (Radosavljevic y Anderson, 2014), y permite establecer áreas de alta idoneidad para establecer UPGF donde habitan las especies de interés. Por lo tanto, conocer la distribución potencial o el nicho ecológico de las especies es clave para comprender los patrones ambientales y geográficos de su distribución; información previa que es necesaria para poder conservar y utilizar sustentablemente los recursos genéticos de un ecosistema o para el establecimiento de UPGF (Secretaría de Economía, 2016).

Las especies que presentan una distribución geográfica extensa y variabilidad fenotípica amplia, es importante realizar una subdivisión de acuerdo con sus requerimientos agroecológicos (Flores *et al.*, 2019), una forma de hacerlo es mediante el establecimiento de huertos semilleros, donde los individuos seleccionados con características superiores para estos huertos puedan asegurar el nivel de adaptación y la identidad del germoplasma a producir (White *et al.*, 2007).

A nivel mundial, las especies del género *Pinus* son de las más utilizadas en el establecimiento de PFC debido a su extensa distribución geográfica, alta rentabilidad económica y comercial, además de su adaptabilidad (FAO, 2018 y 2020). La familia Pinaceae incluye 11 géneros y 228 especies en todo el mundo y tiene un centro de alta diversidad en América del Norte y Central (Farjon y Styles, 1997; Farjon, 2008; Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015). En México existen 49 de las 120 especies reportadas del género *Pinus* (Farjon y Styles, 1997; Farjon, 2008; Gernandt & Pérez de la Rosa, 2014). La gran diversidad climática, topográfica y biológica del país resalta la importancia de la apropiada elección de la especie y variedad al momento de establecer plantaciones forestales con especies de pino, ya que habitan desde altitudes cercanas al nivel del mar (*Pinus caribaea*) o superiores a 4,000 msnm (*Pinus hartwegii*) (Farjon, 2008; Gernandt & Pérez de la Rosa, 2014; Schoettle *et al.*, 2019).

En el caso particular de *Pinus pseudostrobus*, la información existente sobre la especie indica que es necesario tomar en cuenta varios aspectos importantes y resolver diversos problemas tecnológicos en el proceso de implementación de un programa operativo de mejoramiento genético. En primer lugar, *P. pseudostrobus* tiene una distribución geográfica amplia en México, creciendo en condiciones ambientales muy diversas y forma parte de un grupo taxonómico relativamente complejo (Martínez, 1948; Stead, 1983; Stead y Styles, 1984; Perry, 1991). De hecho, la taxonomía de esta especie es muy controvertida, lo cual se muestra en la diferente integración y acomodo que hacen del grupo pseudostrobus autores como Perry (1991) y Farjon y Styles (1997). Algunos autores como Martínez (1948) reconocen por su diferenciación morfológica hasta cinco variedades, mientras que otros elevan algunas de ellas a la categoría de especie y consideran solo 2 o 3 variedades (*pseudostrobus*, *apulcensis* y *coatepecensis*), con una o varias formas (Stead y Styles, 1984; Perry, 1991; Farjon y Styles, 1997).

Aunque las diferentes unidades taxonómicas involucradas en el complejo *pseudostrobus* presentan traslape en su área de distribución reconocida, muestran

diferencias importantes en su potencial productivo y en sus preferencias de hábitat; por ejemplo, la var. *pseudostrobus* crece en sitios con suelos profundos y muy fértiles, mientras que la var. *apulcensis* habita lugares más secos y con suelos someros, y la var. *oaxacana* (considerada como especie por Perry (1991), se desarrolla principalmente en lugares secos. En estudios recientes se han encontrado diferencias importantes en características de crecimiento y de valor adaptativo entre la var. *pseudostrobus* y la var. *apulcensis* (Viveros-Viveros *et al.*, 2006).

El mejoramiento genético con especies forestales se realiza en huertos semilleros asexuales (HSA) y bancos clonales (BC). En los HSA, la semilla genéticamente mejorada se produce a través de polinización abierta o controlada (Stewart *et al.*, 2016), y en los BC es posible producir clones idénticos a través de la propagación vegetativa (PV) (Oliveira *et al.*, 2018). El injerto es el método de PV más utilizado para establecer HSA y BC con especies del género *Pinus*, ya que permite la multiplicación de árboles adultos con características genéticas superiores de interés económico y ecológico (Wang, 2011; Stewart *et al.*, 2016; Vargas-Hernández & Vargas-Abonce, 2016; Pérez-Luna, *et al.*, 2020).

Un injerto es la unión de dos plantas, el portainjerto (planta patrón) y la yema o brote, de diferente origen (Wang, 2011; Darikova *et al.*, 2013). Los injertos pueden ser intraespecíficos (yema y portainjerto de la misma especie) o interespecífico (yema y portainjerto de diferentes especies) (Opoku *et al.*, 2019), ambos utilizados en coníferas para multiplicar el genotipo de árboles adultos con características deseables, como velocidad de crecimiento, rectitud del fuste, vigor, resistencia a plagas y enfermedades, entre otras (Zobel & Talbert, 1988; Vargas *et al.*, 2004; CONAFOR, 2017; Flores *et al.*, 2017; Ranjith e Ilango, 2017). Las técnicas de injertado enchapado lateral y fisura terminal son las más utilizadas en trabajos con especies de pino (Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; González, 2017; Pérez-Luna *et al.*, 2019; Pérez-Luna *et al.*, 2020).

Sin embargo, es necesario evaluar si estas técnicas de injertado son igualmente efectivas para la especie y algunas de sus variedades y si es posible aumentar el éxito, el crecimiento y la supervivencia de los injertos y reducir los problemas de compatibilidad que se han observado en algunos casos con especies de este género (Castro-Garibay *et al.*, 2017). Para ello, es necesario investigar varios aspectos en el injertado, que incluyen, señalar el área potencial donde se pueden establecer UPGF con la finalidad de mejorar la calidad genética de esta especie, además, es conveniente evaluar el efecto del origen de la yema, la fertilización y cultivo de los portainjertos en vivero, la época de injertado, así como la técnica y tipo de injertado, respecto al éxito, crecimiento y supervivencia durante y después del injerto con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

La presente tesis se compone de cuatro capítulos, en el primero de ellos se presenta una revisión sobre el uso de los modelos de distribución de especies forestales, el mejoramiento genético forestal, el establecimiento de huertos semilleros, las técnicas de propagación vegetativa basadas en métodos de injertado y aplicadas al mejoramiento genético de especies del género *Pinus*, también se describen brevemente los factores involucrados en el éxito del injerto.

En el segundo se utilizan modelos de distribución potencial para distinguir áreas idóneas donde se pueden establecer Unidades Productoras de Germoplasma Forestal (UPGF) con dos variedades de *Pinus pseudostrobus* (var. *pseudostrobus* y *apulcensis*) en el estado de Michoacán y Oaxaca, México. Para reducir costos en la búsqueda de los mejores individuos y establecer UPGF en ambos estados que garanticen la distribución continua y amplia del germoplasma de ambas variedades.

En el tercero se determinó el efecto de la época de injertado, el tipo de injerto, el origen del material vegetativo y la preparación de la planta portainjerto en el prendimiento, crecimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*. Los factores estudiados (a, b, c y d) incluyeron

diferentes niveles de interacción: (a) procedencia de las yemas, con dos niveles (dos procedencias geográficas); (b) portainjerto, con tres niveles (tres diferentes dosis de fertilización en la preparación del portainjerto); (c) época de injertado, con tres niveles (tres épocas de injertado); y (d) método de injertado, con dos niveles (dos tipos de injerto). Con lo anterior se planteó que el crecimiento, prendimiento y porcentaje alto de supervivencia de los injertos dependen de los factores externos e internos involucrados, así como de las técnicas de manejo y características propias de los individuos utilizados.

En el cuarto capítulo abordó la compatibilidad intraespecífica e interespecífica en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*, donde se distinguen tres niveles de afinidad: 1. Injertos entre patrones y yemas del mismo árbol para cada variedad sin importar la procedencia. 2. Injertos con patrones de una familia y yemas de otros clones dentro de una misma variedad, de manera que interactúan con materiales de diferentes poblaciones o localidades y 3. injertos intervarietales donde se utilizaron patrones de una familia de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* con yemas de otros clones de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y viceversa. Para cada nivel de afinidad se evaluó el prendimiento, vigor, crecimiento del brote y el porcentaje de supervivencia. Se determinó en que niveles de afinidad es posible realizar injertos con mayor éxito de la especie y variedades estudiadas.

### **1.1. Justificación**

Es conveniente resolver el problema de la disponibilidad de germoplasma con las características deseadas de productividad y adaptación para dos variedades de *Pinus pseudostrobus* que son utilizadas ampliamente en programas de reforestación, restauración, conservación y plantaciones forestales comerciales en Michoacán y Oaxaca, para ello se debe identificar el área óptima de desarrollo de ambas variedades a través de modelos de distribución potencial e iniciar con el establecimiento de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal para dar inicio

a un programa de mejoramiento genético a través del establecimiento de huertos semilleros asexuales, producidos a partir de técnicas de propagación vegetativa basadas en métodos de injertado, que permitan maximizar la calidad genética de los mejores individuos y asegurar un abasto de germoplasma mejorado y adaptado al ambiente de plantación, a bajo costo y largo plazo. Además, es conveniente evaluar diversos factores tanto internos como externos que se presentan durante y después del injerto y que influyen directamente en el éxito, crecimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intra e interespecíficos con la especie y variedades estudiadas.

## 1.2. Hipótesis

Para este estudio se determinó una hipótesis por capítulo, que a continuación se mencionan:

- Existe un porcentaje similar y alto de traslape del área en donde se pueden encontrar potencialmente ambas variedades de *P. pseudostrobus* en Michoacán y Oaxaca, para establecer Unidades Productoras de Germoplasma Forestal.
- Existen diferencias de crecimiento, prendimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* dependiendo de los factores externos e internos involucrados, así como de las técnicas de manejo y características propias de los individuos utilizados
- Existen diferencias de compatibilidad intra e interespecífica en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* que expresan mayor prendimiento, mejor crecimiento y un porcentaje alto de supervivencia.



### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Determinar la distribución potencial de ambas variedades de *P. pseudostrobus* para proponer áreas más pequeñas que permitan seleccionar individuos genéticamente superiores y evaluar la respuesta de técnicas de propagación vegetativa basada en métodos de injertado entre poblaciones naturales y variedades de *P. pseudostrobus*.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Modelar áreas con potencial óptimo para establecer Unidades Productoras de Germoplasma Forestal y seleccionar los mejores individuos para dos variedades de *P. pseudostrobus* en Michoacán y Oaxaca.
- Determinar la influencia de la época de injertado, tipo de injerto, el origen del material vegetativo y la preparación de la planta portainjerto en el prendimiento, crecimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.
- Evaluar la compatibilidad intraespecífica e interespecífica en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

## 1.4. Antecedentes

### 1.4.1. Modelos de distribución potencial de especies forestales

Los modelos de distribución (MDE), indican la idoneidad de un hábitat para el desarrollo de las poblaciones de una especie o de una comunidad, para el cálculo de dicha idoneidad se emplean algoritmos o métodos estadísticos computarizados que definen las relaciones entre la presencia o ausencia conocida de la especie y un conjunto de variables ambientales, topográficas o de sitio (Guzmán-Vera, 2018; Singh *et al.*, 2018). A partir de estas relaciones se pueden generar mapas predictivos sobre la distribución potencial de la especie en el espacio geográfico (Guzmán-Vera, 2018). El algoritmo MaxEnt (modelo de máxima entropía) es el más aceptado (Radosavljevic y Anderson, 2014), puede estimar la distribución y probabilidad de ocurrencia en el presente y futuro de una especie basada en el conocimiento de las condiciones ambientales de los sitios donde ésta habita, ya que permite establecer áreas de alta idoneidad y de distribución potencial (Soberón, 2010).

En la actualidad y con el fin de contribuir al conocimiento de las especies y su interacción con el ecosistema, se han realizado trabajos de modelación en combinación con los sistemas de información geográfica (SIG) para diferentes especies y con diversos enfoques; de acuerdo con lo reportado por Navarro-Cerrillo *et al.* (2016), Martínez-Rincón *et al.* (2016) y Hernández-Ramos *et al.* (2018), los principales enfoques de las investigaciones son: 1) definir áreas de distribución potencial para su conservación y restauración, 2) delimitar áreas de mayor probabilidad de ataque de plagas forestales en bosques de coníferas y su prevención y control anticipado, 3) delimitar áreas con mayor potencial de éxito en la reforestación y establecimiento de plantaciones forestales para algunas especies de *Pinus sp.*, *Quercus sp.*, *Crataegus sp.* y *Acer sp.*, y 4) identificar áreas de conservación y refugio ante escenarios de variación climática para especies tropicales, entre otros.

Por otra parte, el uso de las especies del género *Pinus* es muy variado, por lo tanto, es conveniente tomar acciones para delimitar áreas más pequeñas que permitan la movilidad de su germoplasma (Flores *et al.*, 2019), ya que las especies de este género se distribuyen en condiciones ambientales contrastantes, habitando en climas templados, lugares semidesérticos o en ambientes tropicales (Farjon y Styles, 1997). Una opción es establecer unidades productoras de germoplasma forestal (UPGF) que funcionen como reservorios de material biológico y como fuente de materia prima para la obtención de plantas destinadas a las actividades de restauración, reforestación y mejoramiento genético (CONAFOR, 2019).

Los criterios para su selección han surgido a partir de métodos silvícolas, basados fundamentalmente en la selección de árboles con fenotipo sobresaliente (p. ej. mayor crecimiento en altura y diámetro, fustes rectos, edad productiva y resistencia a plagas o enfermedades) (Zobel y Talbert, 1988). Los MDE son de gran importancia y relevancia en el contexto forestal debido a que permiten predecir la distribución potencial de una especie o variedad de interés, además, de reducir tiempos y costos en su búsqueda (Reynoso-Santos *et al.*, 2018), sobre todo si dicha especie será incluida a futuro en un programa de mejoramiento genético forestal (Flores *et al.*, 2019).

#### **1.4.2. Mejoramiento genético forestal**

El mejoramiento genético forestal (MGF) es una herramienta adicional de la silvicultura que permite el estudio del tipo y constitución genética de los árboles utilizados en la operación y manejo forestal, se enfoca principalmente en los diferentes grados de variación genética que presentan las poblaciones de una especie, especialmente cuando esta se exhibe entre y dentro de la población estudiada (Zobel y Talbert, 1988). A través del MGF se puede seguir un proceso de selección y desarrollo de poblaciones o especies forestales genéticamente superiores que permitan utilizar germoplasma forestal de calidad superior (semillas o material para propagación vegetativa) con el cual se pueden establecer

plantaciones mejoradas (Zobel y Talbert, 1988; Flores *et al.*, 2017). La meta principal del MGF es maximizar la adaptabilidad de las especies a los sitios potenciales de plantación para obtener un mayor porcentaje de supervivencia, también, permite aumentar la tasa de crecimiento, mejorar la resistencia a plagas o enfermedades y obtener productos de alta calidad para la industria forestal (Zobel y Talbert, 1988). Los objetivos particulares del MGF pueden ser diversos, y están orientados a aumentar el rendimiento y calidad del arbolado, a desarrollar líneas de árboles resistentes a plagas y enfermedades o con características especiales para un producto determinado, o inclusive a mejorar la capacidad de adaptación de los árboles a terrenos que representan condiciones adversas para la producción forestal (Ledig, 1986).

Para que un programa MGF tenga éxito, es necesario contemplar dos aspectos fundamentales en relación con sus objetivos. En primer lugar, debe ser a corto plazo y estar orientado con la producción de semilla mejorada para satisfacer las necesidades inmediatas de un programa de plantaciones; que permite cuantificar y aumentar la ganancia genética rápida y eficientemente en las fases iniciales del programa, tanto para justificar las actividades de mejoramiento como para recuperar la inversión (Zobel y Talbert, 1988).

En segundo lugar, el MGF debe realizarse a largo plazo, y estar orientado a mantener una base genética amplia que permita un avance continuo en las siguientes generaciones de mejoramiento genético de las especies forestales (Zobel y Talbert, 1988; Vargas *et al.*, 2004). Durante este proceso es conveniente iniciar con programas de selección de especies a través de diversos métodos; donde cuidadosamente se eligen árboles de interés económico que presentan características sobresalientes como velocidad de crecimiento en altura y diámetro, rectitud del fuste, poda natural o fustes limpios, producción abundante de semilla, resistencia a plagas y enfermedades, y que expresen vigorosidad alta y se encuentren en los estratos dominantes o codominantes para ser incluidos en plantaciones especiales llamadas huertos semilleros (Zobel y Talbert, 1988).

### 1.4.3. Establecimiento de huertos semilleros

El establecimiento de huertos semilleros tiene como finalidad lograr la producción masiva del material seleccionado dentro de un programa de MGF, y está diseñado para lograr mayores ganancias genéticas que se obtienen como resultado del esfuerzo combinado de los programas de selección y mejoramiento genético (Pardos y Gil, 1986; Zobel y Talbert, 1988).

Un huerto semillero es una plantación *ex situ* con material reproductivo de árboles genéticamente superiores, que han sido seleccionados con base en ciertas características de importancia económica, aisladas y manejadas intensivamente para reducir la contaminación de polen de árboles inferiores, para aumentar la producción de semilla y facilitar su recolección (Zobel y Talbert, 1988; Jaquish, 1997).

Existen dos tipos de huertos semilleros: sexuales (HSS) y asexuales (HSA). El HSS se establece mediante la siembra de plántulas procedentes de árboles superiores previamente seleccionados, que posteriormente se depura, dejando solo los mejores individuos de las mejores familias para la producción de semilla (Zobel y Talbert 1985; Flores *et al.*, 2017). Los HSA se establecen por medio de técnicas de propagación vegetativa mediante injerto, enraizado de estacas y cultivo de tejidos (Jaquish, 1997; Vargas-Hernández & Vargas-Abonce, 2016).

Algunas de las ventajas de los HSA, es la reducción del tiempo para iniciar la producción de semillas con respecto a un huerto establecido de manera sexual (Pardos y Gil, 1986). Otras de las ventajas que ofrece es que se tiene una menor dificultad de recolección del germoplasma que pudiera ser una opción al suministro de la demanda de semilla para programas de reforestación y de mejora genética, además, de la obtención de material genéticamente mejorado al menor costo posible (Zobel y Talbert 1985; Jaquish, 1997).

#### 1.4.4. Propagación vegetativa a través de injertos

La propagación vegetativa (PV) constituye una alternativa para la multiplicación de individuos que han mostrado características superiores al resto de la población; en especies forestales el principal interés es conservar genotipos valiosos (Bonga, 2016). Existen distintos métodos de PV, con ventajas y desventajas cada uno, varios de estos métodos se han utilizado en coníferas (Zobel y Talbert, 1988; White *et al.*, 2007). El injerto es uno de ellos, tiene sus orígenes en la agricultura y es usado ampliamente en fruticultura, sin embargo, su aplicación en árboles forestales es más reciente (Hartmann *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; Bonga, 2016), su implementación ha permitido clonar íntegramente las características genotípicas de árboles adultos que presentan baja o nula capacidad para ser multiplicados a través de otras técnicas de PV, como acodos aéreos o por estacado (Wang, 2011).

El injerto a menudo es más exitoso que estas técnicas, y con un portainjerto apropiado, puede producir un árbol que exhibe las mejores cualidades tanto del portainjerto como de los árboles propagados (Kita *et al.*, 2018). Por lo tanto, el injerto se usa para propagar especies difíciles de enraizar (Fujisawa y Ueda, 2012). En la silvicultura se ha utilizado casi exclusivamente para la propagación clonal en los huertos de semillas genéticamente mejorados en varias especies de interés ya que son útiles para preservar árboles élite y establecer bancos clonales asexuales (Stewart *et al.*, 2016), estos trabajos se han realizado con distintas especies como el pino de Monterrey (*Pinus radiata* D. Don), el pino de aro (*Araucaria cunninghamii* Ait.), Pino Slash (*Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*), Pino caribeño (*Pinus caribaea* Mor.), Eucalipto (*Eucalyptus* sp.) Abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) y muchos otros (Porada, 1993).

El injerto como técnica de propagación se ha documentado desde la antigüedad (White *et al.*, 2007), durante el siglo pasado Bailey (1891) describió e ilustró los métodos de injerto y gemación utilizados comúnmente en árboles forestales en los Estados Unidos y Europa; en la actualidad estos métodos no han presentado

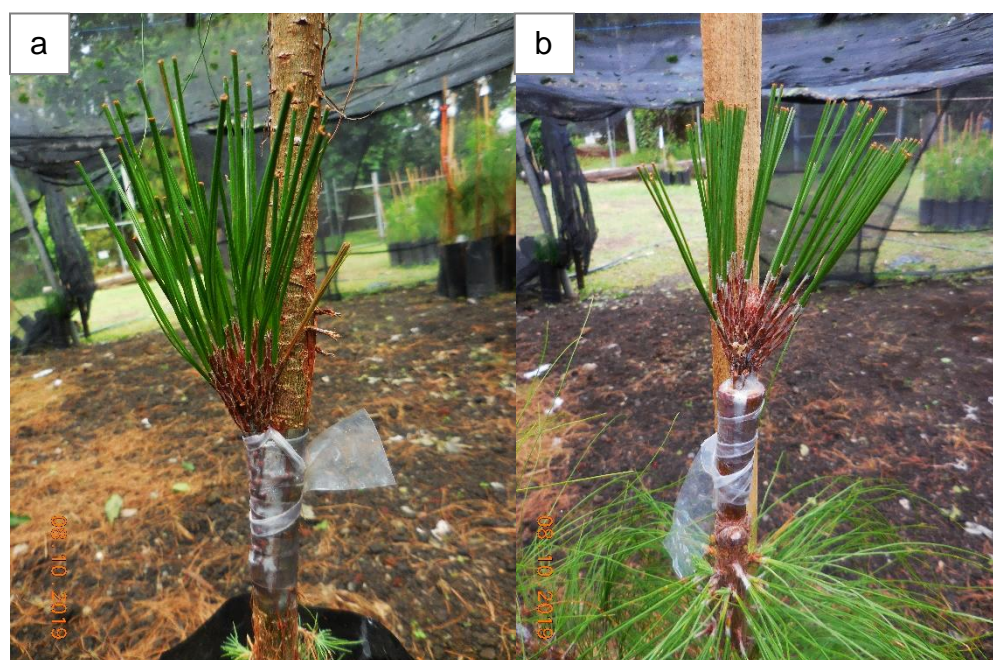
grandes cambios respecto a su implementación (Blada & Panea, 2011). El injerto está constituido básicamente por dos partes: la púa o injerto que es un brote o yema desprendida de un árbol donador, que al unirse al patrón desarrollará la parte aérea de la nueva planta. El patrón o portainjerto constituye la parte baja de la nueva planta, que es la que recibe y se fusiona con la púa, y su función es proporcionar el sistema radical que proveerá de anclaje, agua y nutrientes para el crecimiento de la púa (Fujisawa y Ueda, 2012; Ranjith e Ilango, 2017; Kita *et al.*, 2018).

Se han desarrollado diversas investigaciones de injertos en coníferas a nivel mundial, sin embargo, en México han sido poco documentadas, ya que solo existen algunos reportes con diferente grado de éxito logrado a partir de las últimas cinco décadas, aplicadas al género *Pinus*. El primer reporte se documentó en 1978 con *Pinus pseudostrobus* Lindl. (Carrera & Villaseñor, 1982), posteriormente en *P. patula* Schl. et Cham (Villaseñor & Carrera, 1980); *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* Mtz. (Barbosa *et al.*, 1984); *P. douglasiana* Mtz. (Talavera, 1989; López, 2005), *P. greggii* Engelm (Becerra & Plancarte, 1993); *P. pseudostrobus* (Muñoz *et al.*, 2011 y 2013); *P. arizonica* Engelm (Rodríguez, 2013); *P. patula* (Aparicio-Rentería *et al.*, 2013); *P. leiophylla* Schiede ex Schldl. et Cham (Cuevas *et al.*, 2015); *P. leiophylla* (González, 2017); *Pinus engelmannii* Carr (Pérez-Luna *et al.*, 2019) y *P. arizonica* Engelm (Pérez-Luna *et al.*, 2020).

#### **1.4.5. Métodos de injertado en pino**

El éxito de la propagación mediante injerto en pinos requiere del dominio y manipulación adecuada de la técnica; así como de la correcta unión de la yema-portainjerto; para que esto suceda se deben realizar injertos con plantas de gran parentesco, por lo tanto, el injerto puede ser intraespecífico (yema y portainjerto de la misma especie) o interespecífico (yema y portainjerto de diferentes especies) (Opoku *et al.*, 2019). Por otra parte, la técnica de injertado debe ser impecable para evitar principalmente rasgaduras, entrada de aire y agua, un buen amarre junto con un buen manejo posterior al injerto y así aumentar el prendimiento (Darikova *et al.*,

2013; Wang, 2011). El método de injertado está basado en la habilidad del patrón y la púa, para desarrollar nuevas células a lo largo de las superficies de corte y unirse formando un solo individuo (Bailey, 1891; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013). El injertado es una práctica que ha generado variantes en sus técnicas básicas, por lo que se han descrito diversos tipos y modificaciones; sin embargo, de los tipos de injertos conocidos, sólo unos cuantos se han adaptado a especies de coníferas, siendo los más utilizados el injerto de enchapado lateral y fisura terminal (Figura 1) (Bailey, 1891; Wang, 2011; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; Opoku *et al.*, 2019; Perez-Luna *et al.*, 2019 y 2020).



**Figura 1.** Principales métodos de injertados en *Pinus pseudostrobus* Lindl. A) injerto de enchapado lateral y B) Injerto de fisura terminal (Foto: Propia).

Para que el injerto sea exitoso, durante la ejecución de la técnica de injertado y en conjunto con otros factores, debe existir contacto entre ambas regiones cambiales (tejido de crecimiento del cambium entre floema y xilema) de la yema o púa y el portainjerto bajo condiciones favorables (Wang, 2011). Durante este proceso se reconocen tres etapas importantes del desarrollo del injerto: formación de callos, diferenciación cambial y continuidad cambial (formación de tejido vascular); en la primera, la capa externa cambial de ambas estructuras produce células



parenquimáticas y se lleva a cabo la formación del callo; en la segunda, algunas células del callo se diferencian en células cambiales y producen nuevo tejido vascular, y en la tercera se presenta continuidad cambial ya que existe xilema interior y floema hacia el exterior permitiendo una fuerte conexión entre púa-portainjerto que garantiza el éxito de este (Hartmann *et al.*, 2011).

#### **1.4.6. Factores involucrados en el éxito del injerto**

El éxito o fracaso de los injertos en pino está en función de factores internos relacionados con la incompatibilidad entre la púa y la planta portainjerto (Darikova *et al.*, 2013; Goldschmidt, 2014) que presentan una conexión vascular pobre o discontinua y degradación del floema en el punto de conexión dando como resultado una insuficiente unión, poco desarrollo y mortandad durante o posterior al injerto, incluso una vez establecido en campo (Castro-Garibay *et al.*, 2017).

También se debe a factores externos relacionados con el origen geográfico de la púa, que tiene mayor efecto sobre la supervivencia que las características del portainjerto (Villaseñor & Carrera, 1980); sin embargo, la calidad del portainjerto que se utiliza tiene efectos significativos sobre la supervivencia y el crecimiento de los injertos (Goldschmidt, 2014). Además, para injertos con especies leñosas (en este caso pinos), es aconsejable seleccionar yemas y portainjertos de la mejor calidad posible (Darikova *et al.*, 2013; Wang, 2011).

La época de injerto ha sido señalada como un factor determinante en el éxito del injerto ya que autores como Muñoz *et al.* (2013), Goldschmidt (2014), Gaspar *et al.* (2017) y Perez-Luna *et al.* (2020), lo indican en sus trabajos ya que el mejor momento para injertar especies leñosas como los pinos es en época invernal, es decir, entre diciembre y febrero cuando las yemas se encuentran en quiescencia inicial. No obstante, también se ha señalado que es posible injertar coníferas en cualquier época del año, si la temperatura y la humedad del sitio donde se mantienen los injertos son controlados en invernadero (Nienstaedt, 1965).

Por otra parte, en varios estudios de coníferas se ha demostrado que los injertos obtenidos de árboles menores de 50 años aumentan el éxito del injerto (Hartmann *et al.*, 2011; Bonga, 2016, Fujisawa y Ueda, 2012; Goldschmidt, 2014). Un factor adicional en el éxito del injerto que también debe considerarse según Hibbert-Frey *et al.* (2011) es la experiencia del injertador ya que el porcentaje de prendimiento puede variar dependiendo de los años de experiencia (como mínimo 2 años) que este tenga.

En general, los avances en la propagación vegetativa mediante injerto en coníferas son escasos en México, por lo tanto, es conveniente seguir investigando sobre estos aspectos y generar un protocolo de injertado con aquellas especies de interés desde el punto de vista económico, ecológico y social, como lo es *P. pseudostrobus*, tomando en cuenta los factores favorables y las limitaciones de los sitios donde se pretende llevar a cabo dichas acciones para su conservación y propagación mediante el establecimiento de HSA a futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chavez, H. M., Villalobos-Arambula, A. R., Perez de la Rosa, J. A., & Raes, N. (2015). Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely related Mexican white pines. *Diversity and distributions*, 21(3): 245-257. DOI:10.1111/ddi.12268.
- Aparicio-Rentería, A., Viveros-Viveros, H., & Rebolledo-Camacho, V. (2013). Huertos semilleros clonales: una alternativa para los programas de reforestación en Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(20): 90-97.
- Bailey, L. H. (1891). *The Nursery-book: A Complete Guide to the Multiplication and Pollination of Plants*. Createspace Independent Pub. 310 p.
- Barbosa G, G., V. Sánchez A. y V. Velazco F. (1984). Pruebas de injertado en *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* Mtz., en los Altos de Chiapas. Boletín Técnico No. 99. SARH. SFF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D.F. 35 p.
- Becerra, O. E. C., & Plancarte, B. A. (1993). Propagación asexual en *Pinus greggii*, injertos, enraizado de estacas y acodos aéreos. *Agrociencia, Recursos renovables*, 3(1): 97-110.
- Bonga, J. M. (2016). Conifer clonal propagation in tree improvement programs. In Park, Y., Bonga, J., & Moon, H., Vegetative propagation of forest trees. Seoul, Korea: *National Institute of Forest Science*. 3-31p.
- Burney, O., Aldrete, A., Alvarez-Reyes, R., Prieto-Ruiz, J. A., Sanchez-Velazquez, J. R., & Mexal, J. G. (2015). México-addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry*, 113(4): 404-413. DOI: 10.5849/jof.14-007.

- Blada I. & Panea T. (2011). Improvement of grafting procedures for the ornamental species: I. *Picea pungens* Engelm. var. *glauca* Regel. *Ann. For. Res.* 54(2): 185-196, 2011.
- Carrera G. M. S. y R. Villaseñor, R. (1982). Ensayo de dos métodos de injerto en *Pinus pseudostrobus* Lindl. Boletín Técnico No. 75. SARH. SFF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D.F. 15 p.
- Castro-Garibay, S. L., Villegas-Monter, A., & López-Upton, J. (2017). Anatomy of rootstocks and scions in four pine species. *Forest. Res.* 6: 1–6. DOI: 10.4172 / 2168-9776.1000211
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Manual para el Establecimiento de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal. 86 p. Disponible en: [https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/manual\\_para\\_el\\_estab\\_12bce8a9.pdf](https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/manual_para_el_estab_12bce8a9.pdf) (abril de 2020).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017). *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *pseudostrobus*. SIRE Paquetes Tecnológicos. CONAFOR-CONABIO. México. 7 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/981Pinus%20pseudostrobus.pdf> (abril de 2020).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2011). Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. (Velázquez-Martínez, A., coordinador y editor técnico). Comisión Nacional Forestal, SEMARNAT. 448 p.
- Cuevas, C, J. C., Jiménez C, M., Jasso M, J., Pérez R, P., López U, J., & Villegas M, Á. (2015). Propagación asexual de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldl. et Cham. *Revista chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 21(1): 81-95. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2014.08.033

- Darikova, Y. A., Vaganov, E. A., Kuznetsova, G. V., & Grachev, A. M. (2013). Changes in the anatomical structure of tree rings of the rootstock and scion in the heterografts of Siberian pine. *Trees*, 27(6): 1621-1631. DOI: 10.1007/s00468-013-0909-6
- Farjon, A. & B.T. Styles. (1997). *Pinus (Pinaceae). Flora Neotropica Monograph 75*. New York, NY: *The New York Botanical Garden*. 291 p.
- Farjon, A. (2008). *A natural history of conifers*. Timber Press, London, UK. 304p.
- Flores, A., López-Upton, J., Rullán-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Alía, R., Sáenz-Romero, C., & Garcia del Barrio, J. M. (2019). Priorities for Conservation and Sustainable Use of Forest Genetic Resources in Four Mexican Pines. *Forests*, 10(8): 675. DOI: 10.3390/f10080675.
- Flores L, C., López U, J., & Valencia M, S. (2017). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. 154 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf> (abril de 2020).
- Fujisawa, Y. & M Ueda, M. (2012) Introduction of forest tree breeding: ABC (1) Technique of producing clonal planting stock: grafting. *Forest Genetics Breed*, 1: 23-27.
- Gaspar, R. G. B., Wendling, I., Stuepp, C. A., & Angelo, A. C. (2017). Rootstock age and growth habit influence top grafting in *Araucaria angustifolia*. *Cerne*, 23(4): 465-471. DOI: 10.1590/01047760201723042447

- Gernandt, D.S. & Perez-de la Rosa, J.A. (2014). Biodiversity of Pinophyta (conifers) in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85: 123–133. DOI: 10.7550/rmb.3219.
- Goldschmidt, E. (2014). Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications. *Frontiers in plant science*, 5: 1-9. DOI: 10.3389/fpls.2014.00727
- González, J. B. (2017). Clonación de árboles maduros de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schldl. Et cham. de un huerto semillero sexual. Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 80 p.
- Guzmán-Vera, M. (2018). Modelos de Distribución Potencial de Especies Forestales en las Sierras de Jaén. Aplicaciones de alta resolución. Tesis de maestría. Universidad de Jaén, Centro de Estudios de Posgrado. Jaén, Andalucía, España. 50 p.
- Hartmann, H.T., Kester, D.E., Davies, F.T., Jr., Geneve, R. L. (2011). *Hartmann and Kester's Plant Propagation: Principles and Practices*, 8th Ed. Pearson Education, Inc. Hoboken, NJ, USA. 928 p.
- Hernandez-Ramos, J., Reynoso-Santos, R., Hernandez-Ramos, A., Garcia-Cuevas, X., Hernandez-Maximo, E., Cob-Uicab, J. V., & Sumano-Lopez, D. (2018). Historical, current and future distribution of *Cedrela odorata* in Mexico. *Acta Botánica Mexicana*, 124: 117-134. DOI: 10.21829/abm124.2018.1305.
- Hibbert-Frey, H., Frampton, J., Blazich, F. A., Hundley, D., & Hinesley, L. E. (2011). Grafting Fraser Fir (*Abies fraseri*): effect of scion origin (crown position and branch order). *HortScience*, 46(1): 91-94. DOI: 10.21273/HORTSCI.46.1.91
- Jaquish, B. C. (1997). Abasto y manejo de semillas a partir de la recolección en rodales naturales, áreas de producción y huertos semilleros. *Manejo de recursos genéticos forestales*, 79-89 p.

- Kita, K., Kon, H., Ishizuka, W., Agathokleous, E., & Kuromaru, M. (2018). Survival rate and shoot growth of grafted Dahurian larch (*Larix gmelinii* var. japonica): a comparison between Japanese larch (*L. kaempferi*) and F1 hybrid larch (*L. gmelinii* var. japonica x *L. kaempferi*) rootstocks. *Silvae Genetica*, 67(1): 111-116. DOI: 10.2478/sg-2018-0016
- Ledig, F. T. (1986). Conservation strategies for forest gene resources. *Forest Ecology and Management*, 14: 77-90.
- López L, J. A. (2005). Huerto semillero y banco clonal de *Pinus douglasiana* Mtz. 57 p.
- Martínez, M. (1948). Los Pinos Mexicanos. Segunda edición. UNAM. México. 361 p.
- Martínez-Rincón, S., J. Hernández-Ramos, J. T. Sáenz-Reyes, I. López-Pérez, J. J. García-Magaña, M. A. Aguilar-Vidales, M. Martínez-Salvador y A. Hernández-Ramos. (2016). Distribución potencial para *Dendroctonus mexicanus* en la Meseta Purhépecha, Michoacán. *Revista mitigación del daño ambiental agroalimentario y forestal de México*, 2(2): 95-104.
- Muñoz, F. H. J., Orozco, G. G., Coria, A. V. M., Toledo, B. R., & Aguilar, G. H. (2011). Validación de dos métodos de injerto de *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Michoacán. Folleto técnico Núm. 24. INIFAP. C.E. Uruapan, Michoacán, México. 43 p.
- Muñoz, F. H. J., Prieto, R. J. Á., Flores, G. A., Pineda, O. T., & Morales, G. E. (2013). Técnicas de injertado "enchapado lateral" y "fisura terminal" en *Pinus pseudostrobus* Lindl. 56 p.

- Navarro-Cerrillo, R. M., I. Clavero, A. Lorenzo V., L. Quero J. y J. Duque-Lazo. (2016). Integración de datos de inventario y modelos de hábitat para predecir la regeneración de especies leñosas mediterráneas en repoblaciones forestales. *Ecosistemas*, 25(3): 6-21. DOI: 10.7818/ECOS.2016.25-3.02
- Nienstaedt, H. 1965. Grafting northern conifers with special reference to white spruce. *In* Proceedings of the Region Nine State Nurserymen's Conference, Duluth, MN, USA. 24–26 p.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings. Rome. 16 p. DOI: 10.4060/ca8753en
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). Boletín de noticias: La producción mundial de productos madereros registra el mayor aumento de los últimos 70 años. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/1256292/icode/> (mayo de 2020).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). El estado de los bosques del mundo (SOFO)- Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. FAO, Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 153 p. Disponible en: <http://www.fao.org/state-of-forests/es/>(mayo de 2020).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2012). Situación de los Recursos Genéticos Forestales en México. informe Final del Proyecto TCP/MEX/3301/MEX (4), 297 p.
- Oliveira, K. F., Nogueira, A. C., & Higa, A. R. (2018). Productivity of cones and seeds in a clonal orchard of *Pinus taeda* Linnaeus. *Advances in Forestry Science*, 5(2): 293-298.



- Osorio-Olvera L., B Vijay., B. Narayani., J. Soberón., M. Falconi. (2016). NicheToolbox: a web tool for exploratory data analysis and niche modeling. version 0.2.5.4. Disponible en: <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/> (mayo de 2020).
- Opoku, E. M., Opuni-Frimpong, E., & Dompok, D. (2019). Developing sustainable regeneration techniques for four African mahogany species: grafting methods for success and growth. *New Forests*, 50(4): 539-554. doi:10.1007/s11056-018-9677-x
- Perry, P. J. 1991. *The Pines of Mexico and Central America*. Timber Press. Portland, Oregon. 231 p.
- Pérez-Luna, A., Prieto-Ruíz, J. Á., López-Upton, J., Carrillo-Parra, A., Wehenkel, C., Chávez-Simental, J. A., & Hernández-Díaz, J. C. (2019). Some factors involved in the success of side veneer grafting of *Pinus engelmannii* Carr. *Forests*, 10(2): 112. DOI: 10.3390/f10020112
- Pérez-Luna, A., Wehenkel, C., Prieto-Ruiz, J. Á., López-Upton, J., & Hernández-Díaz, J. C. (2020). Survival of side grafts with scions from pure species *Pinus engelmannii* Carr. and the *P. engelmannii* x *P. arizonica* Engelm. var. *arizonica* hybrid. *PeerJ*, 8, e8468. DOI: 10.7717/peerj.8468
- Porada, H. (1993). Timber species propagation. Combined Proceedings International Plant Propagators' Society, 43: 80-85.
- Pardos, J. A. & Gil, L. (1986). Los huertos semillero: estudios básicos para su establecimiento en España, ICONA. *Monografías*, 44. 128 p.
- Programa Internacional para la Conservación y Domesticación de Árboles (CAMCORE). (2008). Boletín de noticias CAMCORE para México y

Centroamérica. Universidad Estatal de Carolina del Norte. 2(1), 6. Disponible en: [https://camcore.web00wph.unity.ncsu.edu/files/2015/04/boletincamcore2009\\_2abril.pdf](https://camcore.web00wph.unity.ncsu.edu/files/2015/04/boletincamcore2009_2abril.pdf) (abril de 2020).

Radosavljevic, A. & Anderson. R. P. (2014). Making better MaxEnt models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4): 629-643. DOI: 10.1111/jbi.12227

Ranjith, K. e Ilango, J. V. (2017). Impact of grafting methods, scion materials and number of scions on graft success, vigour and flowering of top worked plants in tea (*Camellia* spp.). *Scientia Horticulturae*, 220: 139-146. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.03.039

Reynoso-Santos, R., Pérez-Hernández, M. J., López-Báez, W., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., Uicab, C. & Reynoso Santos, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48): 47-68. DOI: 10.29298/rmcf.v8i48.114

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 licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México. 51 p.

Secretaría de Economía. (2016). Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana: Establecimiento de unidades productoras y manejo de germoplasma forestal especificaciones técnicas. NMX-AA-169-SCFI-2016. Diario Oficial de la Federación: Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-169-scfi-2016.pdf>. (mayo de 2019).

- Soberón, J. M. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography*, 33(1): 159-167. DOI: 1600-0587.2009.06074.x
- Singh, H., Garg, R. D., Karnatak, H. C., & Roy, A. (2018). Spatial landscape model to characterize biological diversity using R statistical computing environment. *Journal of environmental management*, 206: 1211-1223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.055
- Schoettle, A. W., Burns, K. S., Cleaver, C. M., & Connor, J. J. (2019). "Proactive Limber Pine Conservation Strategy for the Greater Rocky Mountain National Park Area. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-379. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station". 81 p. Disponible en: [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_series/rmrs/gtr/rmrs\\_gtr379.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_series/rmrs/gtr/rmrs_gtr379.pdf). (mayo de 2020).
- SNIGF (Sistema Nacional de Investigación y Gestión Forestal). (2019). Plantaciones Forestales Comerciales. Disponible en: [https://snigf.cnf.gob.mx/plantaciones forestalescomerciales/](https://snigf.cnf.gob.mx/plantaciones-forestalescomerciales/) (abril de 2020).
- Stead, J.W. (1983). Study of variation and taxonomy of the *Pinus pseudostrobus* complex. *The Commonwealth Forestry Review*, 62(1): 25-35.
- Stead, J.W. and B.T. Styles. (1984). Studies of Central American pines: a revision of the '*pseudostrobus*' group (Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 89 (3): 249-275.
- Stewart, J. F., Will, R., Crane, B. S., & Nelson, C. D. (2016). Occurrence of shortleaf × loblolly pine hybrids in shortleaf pine orchards: Implications for ecosystem restoration. *Forest Science*, 63(2): 225-231. DOI:10.5849/forsci.15-167

- Talavera M. I. (1989). Ensayo de tres técnicas de injertación en *Pinus douglasiana*. In: 2° Reunión Científica, Forestal y Agropecuaria. Centro de Investigaciones Forestales y Agropecuarias de Michoacán. Morelia, Michoacán. 72 p.
- Vargas-Hernandez, J. J., & Vargas-Abonce. J. I. (2016). Effect of giberellic acid (GA4/7) and girdling on induction of reproductive structures in *Pinus patula*. *Forest systems*, 25(2): e063. doi:10.5424/fs/2016252-09254.
- Vargas-Hernández, J. J., Bermejo-Velazquez, B & Ledig, F.T. (2004). Manejo de Recursos Genéticos Forestales, segunda edición. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 200 p.
- Villaseñor, R. R. & Carrera, G. M. (1980). Tres ensayos de injertado en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Cien. For. en Méx.* 5 (23): 21-3.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2): 121-126.
- Wang, Y. Q. (2011). Plant grafting and its application in biological research. *Chinese Sci. Bull*, 56: 3511–3517. DOI: 10.1007/s11434-011-4816-1
- Wang, S. & van Kooten, G. C. (2018). Forestry and the new institutional economics: an application of contract theory to forest silvicultural investment. Ed. Routledge. Pp.1-8.
- White, T. L., Adams, T. W. and Neale, D. B. (2007). Forest Genetics. CAB International, Oxford. 682 p.
- Zobel, B. J., & Talbert, J. T. (1988). Técnicas de Mejoramiento Genético de Árboles Forestales. México DF. Ed. Limusa. 545 p.

## **CAPÍTULO II. ÁREAS ÓPTIMAS CON POTENCIAL PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UNIDADES PRODUCTORAS DE GERMOPLASMA FORESTAL CON DOS VARIEDADES DE *Pinus pseudostrobus*.**

### **RESUMEN**

Se determinaron áreas con potencial para establecer Unidades productoras de Germoplasma Forestal (UPGF) con dos variedades de *P. pseudostrobus*. Los objetivos fueron (1) modelar la distribución potencial actual de *Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* con el empleo de algoritmos de MaxEnt y (2) proponer áreas para localizar los mejores individuos y establecer UPGF en Michoacán y Oaxaca, México. Se utilizaron 2,451 datos de presencia obtenidos de registros propios en campo, Sistema Biométrico Forestal, Global Biodiversity Information Facility y del Herbario Nacional MEXU, así como 19 variables predictoras. El 75% de los registros se utilizaron para el entrenamiento y 25 % en la validación. Se evaluó el ajuste y capacidad predictiva de diez modelos, ocho con 1,000 interacciones y dos con 500, a través de pruebas de precisión de AUC (Area Under the Curve), ROC-estándar (Receiver Operating Characteristics), ROC-parcial y prueba de Z para corroborar la validez estadística de los modelos. Los modelos indicaron que las dos variedades presentan zonas similares de distribución potencial en una porción del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, las variables ambientales con mayor contribución al modelo para la variedad *pseudostrobus* fueron las relacionadas con la temperatura; y para la variedad *apulcensis* temperatura y precipitación. El establecimiento de UPGF se puede realizar en zonas de crecimiento óptimo como posible estrategia para generar otras UPGF, pero de mejor calidad genética para las dos variedades.

**Palabras clave:** Áreas óptimas, distribución potencial, Michoacán y Oaxaca, UPGF, variedades de *P. pseudostrobus*.

**OPTIMAL AREAS WITH POTENTIAL FOR THE ESTABLISHMENT OF FOREST  
GERM PLASMA PRODUCING UNITS WITH TWO VARIETIES OF *Pinus*  
*pseudostrobus*.**

**ABSTRACT**

Areas with potential to establish Forest Germplasm Producing Units (UPGF) with two varieties of *P. pseudostrobus* were determined. The objectives were (1) to model the current potential distribution of *Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* and *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* using MaxEnt algorithms and (2) propose areas to locate the best individuals and establish UPGF in Michoacan and Oaxaca, Mexico. 2,451 presence data obtained from own field records, the Biometric System Forestry, Global Biodiversity Information Facility and the MEXU National Herbarium were used, as well as 19 predictor variables. The 75% of the records were used for training and 25 % in validation.

Were evaluated fit and predictive capacity of ten models, eight with 1,000 interactions and two with 500, through testing precision tests of AUC (Area Under the Curve), ROC-standard (Receiver Operating Characteristics), ROC-partial and test of Z to check the statistical validity of the models. The models indicated that the two varieties present similar zones of potential distribution in a portion of the Neovolcanic Axis and the Sierra Madre del Sur, the environmental variables with the greatest contribution to the model for the *pseudostrobus* variety were those related to temperature; and for the *apulcensis* variety, temperature and precipitation. The establishment of UPGF can be carried out in areas of optimal growth as a possible strategy to generate other UPGF, but of better genetic quality for the two varieties.

**Key words:** Optimal areas, potential distribution, Michoacan and Oaxaca, UPGF, varieties of *P. pseudostrobus*.

## 2.1. INTRODUCCIÓN

Las plantaciones forestales permiten solucionar problemas de baja productividad forestal, además permiten restaurar suelos forestales degradados. Un factor clave del éxito de las plantaciones es la producción y manejo de semillas de calidad (Zobel y Talbert, 1988). A nivel mundial, las especies del género *Pinus* son de las más utilizadas en el establecimiento de plantaciones forestales comerciales (PFC) debido a su alta rentabilidad económica y comercial, además, de su capacidad de adaptación a distintas condiciones de sitio (FAO, 2018). En México existen 49 de las 120 especies reportadas para este género (Farjon y Styles, 1997). Debido a la gran diversidad climática, topográfica y biológica del país es importante la elección de la especie y la variedad para establecer PFC (Viveros-Viveros *et al.*, 2006). La selección adecuada del material genético recolectado aumenta la supervivencia y producción de las plantaciones (Flores *et al.*, 2019); sin embargo, los programas de plantaciones forestales comerciales en México utilizan fuentes de semillas en las que no se considera la calidad genética o el origen de los individuos (Castellanos-Acuña *et al.*, 2018). Desde su publicación en 2016, la Norma Mexicana NMXAA-169-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016) especifica los requerimientos para el establecimiento y manejo de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal (UPGF).

La selección de los mejores árboles es una actividad costosa y difícil de realizar (Reynoso *et al.*, 2018), ya que los mayores costos se presentan durante su localización; una manera de abatirlos es focalizar áreas más pequeñas (UPGF) a través de diferentes herramientas de apoyo y planificación como los modelos de distribución potencial de especies. Dichos modelos son capaces de predecir la presencia de una especie en función de variables ambientales (Soberón, 2010; Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015) y se basan principalmente en correlaciones entre registros de presencia conocidos y sus condiciones ambientales específicas (Osorio-Olvera *et al.*, 2016). Para modelar la distribución de especies se han desarrollado diferentes técnicas basadas en algoritmos (Singh *et al.*, 2018), y el

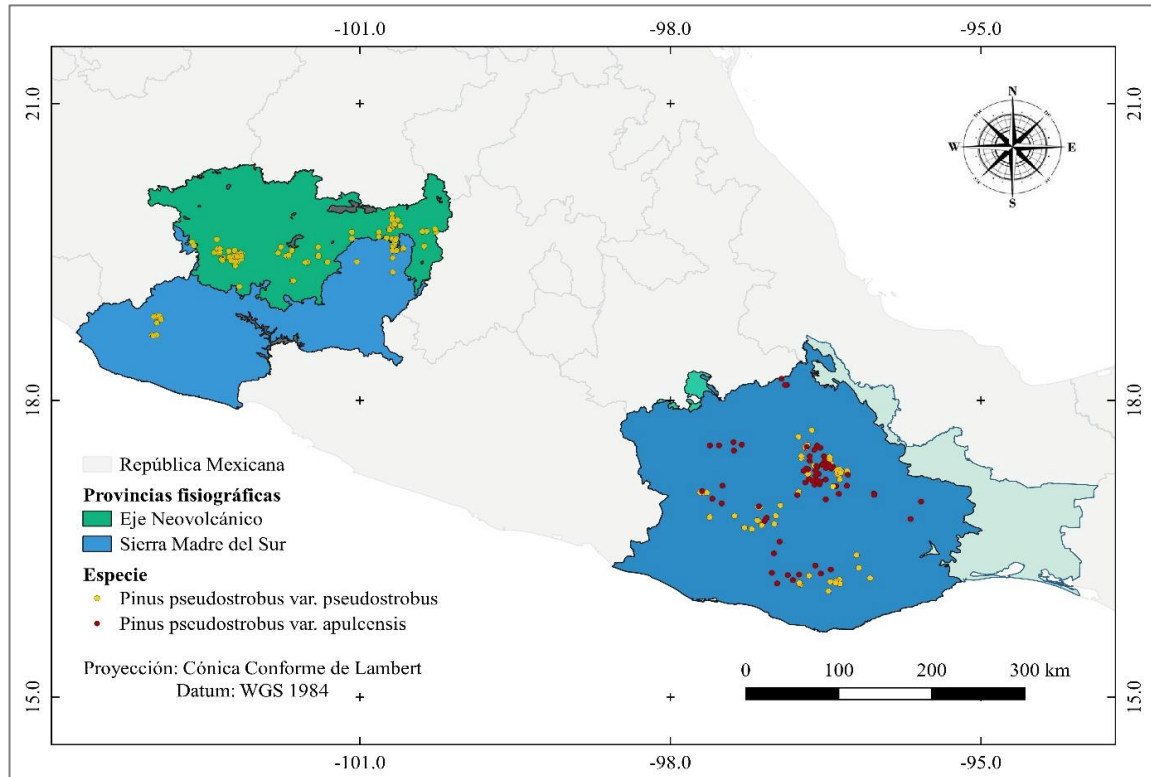
modelo de máxima entropía (MaxEnt) el más aceptado (Radosavljevic y Anderson, 2014). Este algoritmo estima la distribución de probabilidad de menor sesgo que minimiza la información, sujeta a un conjunto de restricciones basadas en el conocimiento de las condiciones ambientales en los sitios de presencia de una especie (Radosavljevic y Anderson, 2014). También hace referencia al diagrama BAM, el cual esquematiza el área de distribución de la especie en determinado tiempo como resultado de una combinación de variables bióticas (B), ambientales (A) y el área de distribución que la especie ha podido alcanzar durante un período de tiempo relevante (M) (Soberón, 2010).

En este estudio se aplicaron modelos de distribución potencial de especies para *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. *pseudostrobus* y *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* Martínez. Estas variedades son utilizadas para el establecimiento de plantaciones forestales comerciales debido a su rentabilidad, calidad de sus productos y su demanda comercial e industrialización (Farjon & Styles, 1997; Viveros-Viveros *et al.*, 2006) en los estados de Michoacán y Oaxaca; sin embargo, existen pocos trabajos relativos a la conservación y regularización del uso de su germoplasma, por lo que los objetivos son (1) modelar la distribución potencial actual de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* y (2) proponer áreas para localizar los mejores individuos y establecer UPGF en dos de los estados de mayor producción forestal de la región centro-sur de México.



## 2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en bosques templados de los estados de Michoacán y Oaxaca, México, dos de las entidades con mayor producción forestal en la región centro y sur del país (Figura 2).



**Figura 2.** Distribución natural de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* en Michoacán y Oaxaca, México. Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, registros propios y del Sistema Biométrico Forestal.

Estas entidades se encuentran en una porción del Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur donde *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* crecen naturalmente (Farjon & Styles, 1997). Los requerimientos agroecológicos de las variedades seleccionadas se obtuvieron del análisis de la información que se presenta en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2019), y del mapa de climas del Instituto Nacional de Estadística y

Geografía (INEGI, 2008) con el que se determinó la precipitación y temperatura promedio (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Requerimientos agroecológicos de *Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*.

Especie	Altitud (msnm)	Precipitación anual total (mm)	Temperatura media anual (°C)	pH del suelo	Textura del suelo (Clase)	Profundidad del suelo (m)
<i>P. pseudostrobus</i> var. <i>pseudostrobus</i>	1,650 a 3,300	1,000 a 1,400	12-18	5 a 6,5	Gruesa / media	1 a 3
<i>P. pseudostrobus</i> var. <i>apulcensis</i>	1,400 a 3,200	800 a 1,400	12-20	4,5 a 7	Gruesa / media	0.5 a 3

### 2.2.1. Obtención de los datos de presencia

Los registros de presencia de cada una de las variedades fueron obtenidos en dos fases. Fase 1: para obtener la distribución potencial actual de la especie, se incluyeron los registros de presencia en las Unidades de Manejo Forestal (UMAFOR) obtenidos del inventario del Sistema Biométrico Forestal para el manejo de bosques templados y selvas de México (SiBiFor) para los estados de Michoacán y Oaxaca. Para complementar la base de datos, también se obtuvieron registros del Herbario Nacional (MEXU) del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM, 2019) y del portal *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, 2019) que incluye datos de herbarios de todo el mundo (periodo no mayor a 50 años).

En la fase 2: para determinar las áreas con potencial óptimo de selección de los mejores individuos, y para establecer UPGF, se utilizaron datos de registros propios en campo obtenidos de 2014 a 2018 que corresponden a árboles superiores (árbol con características fenotípicas deseables) seleccionados a través del método de comparación entre vecinos, propuesto por Zobel y Talbert (1988); este método consiste en elegir un árbol candidato a superior para compararlo cualitativa y cuantitativamente con árboles testigos (tres a cinco árboles de la misma especie

que crecen en las mismas condiciones de sitio) y que finalmente son dictaminados como árboles superiores. Se obtuvieron 2,217 registros georreferenciados en campo (2,100 para *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y 117 de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*), y de las fuentes consultadas (MEXU y GBIF) 234 registros (154 para *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y 80 de *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*); en total se incluyeron 2,451 registros.

Los registros se depuraron en varias fases antes de iniciar la modelación. Primero, se eliminaron datos repetidos, mal georreferenciados y cuya identidad taxonómica hasta especie estaba en duda. Posteriormente, con el programa NicheToolBox de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Osorio-Olvera *et al.*, 2016), se excluyeron todos los valores atípicos geográficos y climáticos, es decir, donde se reportó la especie, pero se encontró fuera de su distribución natural. Finalmente, para evitar problemas de sobremodelación, los puntos de presencia se depuraron y se dejó solo un registro por celda (1 km<sup>2</sup>).

### **2.2.2. Variables predictoras**

La construcción del modelo se realizó con 19 variables bioclimáticas descargadas de la plataforma del Centro de Recursos Idrisi-México de la Universidad Autónoma del Estado de México (CRI-UAEMéx) (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014), las cuales representan el comportamiento climático promedio en México para los años 1910–2009, con resolución espacial de 30 segundos de arco (1 km<sup>2</sup>). Para evitar sobreajuste del modelo (Peterson *et al.*, 2011), se realizó un análisis de correlación de Pearson ( $r \geq 0.85$ ) entre cada uno de los valores puntuales de las 19 capas bioclimáticas, se redujo el número de variables que mostraron multicolinealidad (debido a que presentan relaciones aproximadamente lineales entre los regresores del modelo, cuando los estimadores obtenidos y la precisión de éstos se ven seriamente afectados), conservando sólo aquellas variables altamente correlacionadas ( $r \geq 0.85$ ). El análisis se llevó a cabo mediante el programa Statistica ver. 13.0.

Además, se incluyeron variables del sitio como: pendiente (%), exposición (°) y altitud (m) obtenidas del Modelo Digital de Elevación del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2019). Para que los mapas coincidieran con las fuentes de Worldclim (Worldclim, 2019), en los complementos de GdalTools de la biblioteca de Qgis 3.2.3 (QGIS, 2019) con la herramienta de “alineación de ráster” se estableció una sola resolución (1 km<sup>2</sup>). Para generar el modelo se utilizaron 16 variables bioclimáticas y tres variables de sitio (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Variables incorporadas en la modelación de la distribución potencial de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* y para la selección de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal en Michoacán y Oaxaca ( $r \geq 0.85$ ).

<b>Código</b>	<b>Descripción de las variables bioclimáticas (unidad)</b>
<b>Bio1</b>	Temperatura promedio anual (°C)
<b>Bio2</b>	Oscilación diurna de la temperatura (°C)
<b>Bio3</b>	Isotermalidad (°C)
<b>Bio4</b>	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar *100) (°C)
<b>Bio5</b>	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido (°C)
<b>Bio6</b>	Temperatura mínima del mes más frío (°C)
<b>Bio7</b>	Oscilación anual de la temperatura (°C)
<b>Bio8</b>	Temperatura media del mes más húmedo (°C)
<b>Bio9</b>	Temperatura media del mes más seco (°C)
<b>Bio10</b>	Temperatura media del cuatrimestre más cálido (°C)
<b>Bio14</b>	Precipitación del periodo más seco (mm)
<b>Bio15</b>	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación, CV)
<b>Bio16</b>	Precipitación del trimestre más húmedo (mm)
<b>Bio17</b>	Precipitación del trimestre más seco (mm)
<b>Bio18</b>	Precipitación del cuatrimestre más cálido (mm)
<b>Bio19</b>	Precipitación del cuatrimestre más frío (mm)
<b>Variables del sitio</b>	
<b>Exp</b>	Exposición (°)
<b>Alt</b>	Altitud (m)
<b>Pdt</b>	Pendiente (%)

Fuente: Worldclim ver 2.1 (2019) e INEGI (2019).

### **2.2.3. Delimitación del área accesible (símbolo M)**

El concepto de área accesible para una especie (M) hace referencia al diagrama BAM (Soberón, 2010). Para delimitar el área accesible (M), se utilizaron las Provincias Fisiográficas de México y se escogieron aquellas que coincidieron con los registros de presencia para cada variedad, para evitar provincias que, aunque similares, no tuvieron registros. A partir de la delimitación del área M se recortaron las capas ambientales para cada variedad en formato ASCII con el uso del programa Qgis 3.2.3 (QGIS, 2019).

### **2.2.4. Generación del modelo**

El análisis del área potencial para el establecimiento de UPGF se realizó con el algoritmo de máxima entropía del programa MaxEnt ver. 3. 4. 1, el cual permite escoger los modelos más consistentes a partir de información disponible de datos de presencia; no requiere datos de ausencia y genera buenas predicciones, aún con muestras pequeñas (Radosavljevic y Anderson, 2014).

Se utilizaron los parámetros de elaboración que vienen por defecto en el programa, a excepción de las opciones Extrapolate y Do clamping que se desactivaron para evitar extrapolaciones artificiales en los valores extremos de las variables bioclimáticas. Se obtuvo una salida tipo logística usando un umbral 0-1 (0 = ausencia y 1 = presencia), los valores cercanos a 0 (< 0.5) indican que las condiciones no son idóneas y valores superiores a 0.5 que las condiciones son adecuadas (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014).

El 75 % de los registros se utilizó para el entrenamiento y 25 % para la validación; se probaron diez modelos por variedad, ocho con 1,000 interacciones y dos con 500 (valor por defecto-Bootstrap) y límite de convergencia fijo de 0.00001 (valor por omisión), mediante dos procedimientos: (1) por su desempeño y ajuste estadístico en las pruebas de AUC (*Area Under the Curve*) y del análisis de precisión ROC

(*Receiver Operating Characteristic*) para determinar la validez de los modelos y una prueba Z que establece si dicha relación es menor o cercana a 1 (Radosavljevic y Anderson, 2014); (2) mediante salidas a campo para realizar la evaluación de la distribución de ambas variedades de *P. pseudostrabus*, registrando la presencia o ausencia en el área del modelo.

### **2.2.5. Validación del modelo**

Los modelos con valores de AUC entre 0.7-0.9 para los puntos de entrenamiento y de prueba se consideraron buenos y los modelos con valores  $\geq 0.9$  como excelentes (Peterson *et al.*, 2011). El análisis de significancia estadística de la predicción se realizó a través de 10 pruebas binomiales de omisión al 99 % de confiabilidad. Sin embargo, dado que la utilidad de los análisis ROC ha sido cuestionada por especialistas debido a que los algoritmos solo utilizan datos de presencia y en teoría, también requiere datos de ausencia verdadera (Martínez-Méndez *et al.*, 2016), se realizó el análisis ROC-parcial con el programa Tool for Partial-ROC que permitió contrarrestar las diferencias de AUC. Las corridas se hicieron para cada modelo, utilizando 50 % de los puntos de evaluación independientes remuestreados en 1,000 réplicas bootstrap y un error fijo de omisión no mayor a 5 % (1-omission threshold  $> 0.95$ ). El mejor modelo se eligió de acuerdo con el valor más alto de AUC; valores  $>1$  indican que las predicciones se deben a la modelación y no al azar (Soberón, 2010, Peterson *et al.*, 2011); finalmente, de acuerdo con Martínez Méndez *et al.* (2016) se realizó una prueba Z para determinar si los valores de las proporciones AUC parciales de los modelos de idoneidad eran estadísticamente mejores que un modelo al azar (AUC =1.0).

### **2.2.6. Distribución potencial actual**

Se utilizó la prueba Jackknife para conocer el porcentaje de contribución de cada variable al modelo de distribución actual, con los resultados se identificaron áreas de distribución potencial para ambas variedades; además, se realizaron recorridos

de campo con el propósito de validar los resultados de la modelación, lo que permitió garantizar que efectivamente existen árboles con características fenotípicas deseables para su inclusión en programas de mejoramiento genético forestal; con la información obtenida del modelo se reclasificaron valores del archivo ráster en tres categorías de probabilidad de ocurrencia: baja (0.6-0.7), media (0.7-0.8) y alta (0.8-1.0) y se calculó la superficie potencial actual por decil.

### **2.2.7. Áreas óptimas para el establecimiento de UPGF y selección de los mejores individuos**

Para identificar zonas con potencial óptimo para el establecimiento de UPGF, se calculó la superficie potencial a partir de la reclasificación en categorías binarias de 0 (área no apta) y 1 (área con potencial óptimo) del mejor modelo y se calculó la superficie por decil para conocer el área potencial óptima correspondiente a Michoacán y Oaxaca. Las proyecciones de los modelos y la creación de mapas se realizaron con el programa Qgis 3.2.3 (QGIS, 2019).

## **2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.3.1. Distribución potencial actual**

Después del proceso de depuración de la base de datos el número final de registros fue de 494 para *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y 143 para *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*. La mayoría de los datos eliminados fueron de registros repetidos en un mismo pixel (1 km<sup>2</sup>) o mal georreferenciados. Para delimitar el área óptima de crecimiento y distribución de la especie (M) se utilizaron dos provincias fisiográficas. La variedad *pseudostrobus* se localizó en el Eje Neovolcánico en el estado de Michoacán y la Sierra Madre del Sur en el estado de Oaxaca. Por su parte, la variedad *apulcensis* sólo se localizó en esta última; en más del 50% de ambas provincias fisiográficas el área fue similar, ya que las dos variedades crecen e interactúan entre sí principalmente en el estado de Oaxaca.

De acuerdo con la prueba de ROC estándar, los 10 modelos de idoneidad probados para ambas variedades fueron estadísticamente mejores que el azar según la prueba binomial, que en todos los casos mostró valores significativos ( $P < 0.01$ ). Los resultados de las pruebas de ROC parcial arrojaron razones de AUC con valores significativos ( $P < 0.0001$ ) mayores a 1. Por lo tanto, los modelos se catalogaron como muy buenos. Los valores del AUC para los datos de entrenamiento de la variedad *pseudostrobis* fueron de 0.968 a 0.969 y de 0.963 a 0.970 para la validación. Para la variedad *apulcensis* los valores de AUC para el entrenamiento fueron de 0.959 a 0.969 y para la validación de 0.942 a 0.972 (Cuadro 3).

Los resultados de la prueba Z indicaron que todos los modelos fueron estadísticamente significativos ( $P < 0.01$ ); sin embargo, para la variedad *pseudostrobis*, el modelo dos (M2) presentó el mejor ajuste, con un valor de AUC de 0.969 para el entrenamiento, de 0.964 para la validación y 1.385 para ROC parcial. Para la variedad *apulcensis* el modelo siete (M7) presentó los mejores valores de AUC, con 0.963 para el entrenamiento, 0.972 en la validación y 1.174 en la prueba ROC parcial (Cuadro 3).

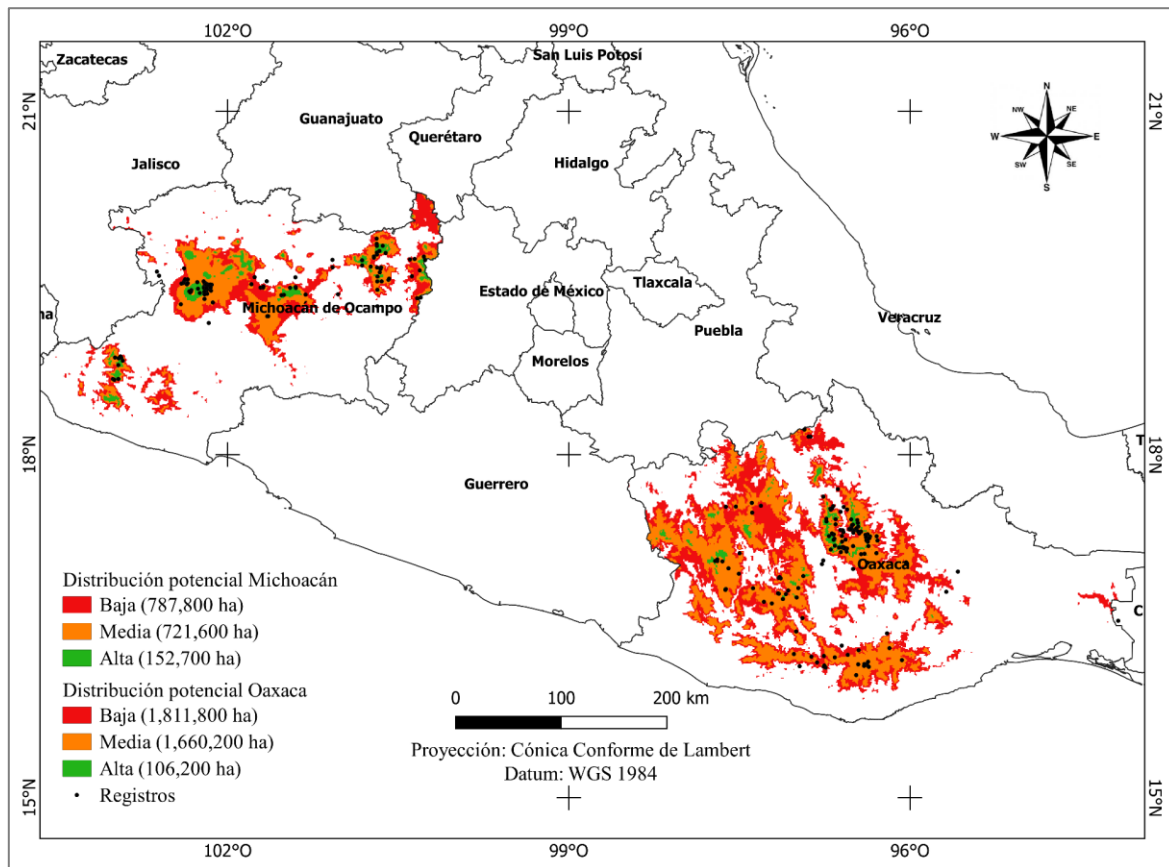
**Cuadro 3.** Valores de las proporciones AUC del análisis de ROC parcial y de Z para los dos mejores modelos de idoneidad en *P. pseudostrobis* var. *pseudostrobis* y *P. pseudostrobis* var. *apulcensis*.

Variedad	Modelo	Valor de AUC en la validación	Proporciones AUC del ROC parcial	DE	Prueba Z valor P
<b><i>P. pseudostrobis</i></b>					
<b>var.</b>	M2	0.964*	1.385	0.003	$P < 0.01$
<b><i>pseudostrobis</i></b>					
<b><i>P. pseudostrobis</i></b>	M7	0.972*	1.174	0.007	$P < 0.01$
<b>var. <i>apulcensis</i></b>					

M2: Modelo dos, M7: Modelo siete, \* Significativos con  $P < 0.01$ , DE: Desviación estándar.



Ambas variedades presentan zonas similares de distribución potencial alto (color verde en Figura 3), en rangos altitudinales óptimos de 2,200 a 3,200 m (2,700 m en promedio) característicos de bosques templados de coníferas. En el estado de Michoacán, la superficie con distribución potencial alta para la variedad *pseudostrobus* es de 152,700 ha, media de 721,600 ha y baja de 787,800 ha. En Oaxaca existen 106,200 ha de distribución potencial alta, media de 1,660,200 ha y baja de 1,811,800 ha, el área de traslape de la distribución potencial equivale al 73.3% del área total, por lo tanto, existen 2,620,316 ha donde potencialmente ambas variedades pueden encontrarse interactuando, esto indica que las dos variedades tienen un nicho similar (espacio ambiental) pero que no es equivalente o idéntico en su totalidad (Figura 3).



**Figura 3.** Distribución potencial de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*, en una porción del Eje Neovolcánico y de la Sierra Madre del Sur en Michoacán y Oaxaca, respectivamente.

Las variables de mayor contribución al modelo para la variedad *pseudostrobis* fueron: Bio4 (Estacionalidad de la temperatura que expresa la desviación estándar de la temperatura media mensual\*100, en cada estación: 48.1 %), Bio10 (temperatura media del cuatrimestre más cálido: 29.3 %) y Bio2 (oscilación diurna de la temperatura: 6.6 %); en contraste, para la variedad *apulcensis*, fueron Bio8 (temperatura media del mes más húmedo: 46.0 %), Bio19 (precipitación del cuatrimestre más frío: 23.9 %) y Bio14 (precipitación del periodo más seco: 4.2 %). Ambas variedades presentaron en común algunas variables, pero con distinta proporción (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Contribución porcentual de las variables a los modelos generados para *P. pseudostrobis* var. *pseudostrobis* y *P. pseudostrobis* var. *apulcensis* de Michoacán y Oaxaca.

<i>P. pseudostrobis</i> var. <i>pseudostrobis</i>		<i>P. pseudostrobis</i> var. <i>apulcensis</i>	
Variable	Contribución porcentual	Variable	Contribución porcentual
<b>Bio4</b>	48.1	Bio8	46.0
<b>Bio10</b>	29.3	Bio19	23.9
<b>Bio2</b>	6.6	Bio14	4.2
<b>Bio1</b>	4.6	Bio9	3.9
<b>Bio5</b>	3.7	Bio18	3.7
<b>Bio16</b>	2.0	Bio6	3.5
<b>Bio3</b>	1.3	Bio3	2.9
<b>Bio19</b>	0.9	Bio1	2.6
<b>Bio8</b>	0.8	Bio10	2.3
<b>Bio9</b>	0.7	Bio15	2.0
<b>Bio7</b>	0.5	Bio07	1.2
<b>Bio6</b>	0.4	Bio16	1.1
<b>Bio17</b>	0.4	Bio04	0.9
<b>Bio14</b>	0.3	Bio05	0.9
<b>Bio18</b>	0.2	Bio02	0.8
<b>Bio15</b>	0.2	-	-

Los modelos obtenidos (M2 y M7) presentaron el mayor ajuste de acuerdo con los resultados de las pruebas de ROC estándar y ROC parcial, ya que estadísticamente fueron mejores que una modelación al azar (valores  $> 1$ ) (Soberón, 2010; García-Aranda *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2018). El hecho de catalogar a los modelos como buenos, se debe a que se usaron todos los datos de presencia en toda el área que ocupan las dos variedades para Michoacán y Oaxaca, junto con los datos de inventarios y registros propios en campo (caso de árboles superiores), que fueron delimitados con las provincias fisiográficas de México (Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur), para que con mayor precisión se estableciera la distribución potencial actual (Cuervo-Robayo *et al.*, 2014); es decir, el área M óptima de acuerdo al diagrama BAM (Soberón, 2010).

Con los resultados obtenidos se puede aseverar que ambas variedades en el estado de Oaxaca ocupan un área de idoneidad similar ya que se encuentran coexistiendo en bosques templados de la Sierra Madre del Sur; en Michoacán, la variedad *pseudostrobus* se localizó en bosques templados del Eje Neovolcánico; en ambos casos, estos resultados coinciden con los conocimientos básicos de la biología de ambas variedades (Farjon & Styles, 1997).

Los estudios que existen sobre la modelación de idoneidad de hábitat para especies del mismo género se centran principalmente en la teoría de nicho ecológico (Reynoso *et al.*, 2018; García-Aranda *et al.*, 2018; Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2019; Flores *et al.*, 2019), utilizando en su mayoría datos de centros de recolección de muestras botánicas; por ejemplo, del Herbario Nacional-MEXU (UNAM, 2019), o de plataformas digitales como *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, 2019) que sólo consideran la presencia de la especie. Sin embargo, si no se realiza una correcta depuración de estos datos (registros mayores de 50 años) puede haber errores con datos repetidos y mal georreferenciados, debido a que el intervalo real de tolerancia climática (intervalo óptimo) es variable entre especies o entre variedades, y aunque convivan en la misma región es posible que haya sobreestimación de los modelos (Perret *et al.*, 2019).

Es conveniente reforzar los registros obtenidos de plataformas digitales o de herbarios con datos de inventarios propios que hayan sido corroborados (como se hizo en este caso), como medida preventiva y de poco riesgo para obtener modelos más confiables. En trabajos similares como el realizado por Reynoso *et al.* (2018) en Chiapas, Méx., utilizaron registros de *P. pseudostrobus* Lindl. y *P. oocarpa* Schiede ex Schtdl., provenientes de plataformas digitales y para modelar la superficie con potencial y establecer UPGF, emplearon variables bioclimáticas y edafoclimáticas (como Bio2, Altitud, Edafología, pH y textura, caso *P. pseudostrobus* y Bio2, Bio14, Altitud, Índice de vegetación diferencial normalizado y precipitación media anual para *P. oocarpa*); y obtuvieron que la mayor superficie con idoneidad para establecer UPGF con ambas especies se encontró al igual que ente trabajo, en una porción de la Sierra Madre del Sur.

De manera similar, Cruz-Cárdenas *et al.* (2016) modelaron la distribución potencial de 12 especies (dos del género *Abies* y 10 de *Pinus*, incluida la variedad *pseudostrobus*) en el estado de Michoacán, empleando cuatro variables de clima (Bio5, Bio6, Bio7 y Bio17), dos de suelo (PH y K) y el modelo digital de elevación de INEGI; donde las provincias fisiográficas con la mayor distribución potencial fueron el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, sin embargo, los autores no lograron separar las diferencias ambientales entre las especies, siendo las mismas condiciones ambientales idóneas para todas estas. Al igual que en este trajo, se debe contemplar el área M de una especie y eliminar la autocorrelación de las variables del modelado, para evitar errores en la distribución potencial de la especie o variedad.

En otro estudio más especializado realizado por Aguirre-Gutiérrez *et al.* (2015) se comparó el nicho ecológico de cinco pinos del subgénero Haploxyton (pinos blancos), se emplearon variables bioclimáticas de Worldclim (resolución de 1 km<sup>2</sup>), edafoclimáticas, la radiación solar y el índice de vegetación de diferencia normalizada. Los autores señalaron que las áreas con mayor potencial y con alta idoneidad para estas especies se encontraron localizadas en el Eje Neovolcánico,

la Sierra Madre del Sur y las Sierras de Chiapas y Guatemala, logrando encontrar diferencias ambientales entre las especies, donde las variables de mayor contribución al modelo fueron Bio3 (*P. ayacahuite* Ehremb. Ex Schltldl y *P. strobus* var. *chiapensis* Martínez), Bio15 (*P. ayacahuite* var. *veitchii* Roetzl), elevación (*P. strobiformis* Engelmann) y radiación solar (*P. lambertiana* D. Douglas). Los resultados de estos estudios refuerzan los obtenidos en el presente trabajo, ya que ambas variedades se localizan en dos centros de idoneidad ambiental en México (Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur) en convivencia con más especies del mismo género.

Las variables que mejor predicen la distribución potencial del género *Pinus*, sobre todo con especies de distribución amplia, se relacionan con la temperatura (García-Aranda *et al.*, 2018), esto coincide con los resultados obtenidos, ya que la variable con mayor contribución al modelo para la variedad *pseudostrobus* fue la estacionalidad de la temperatura (Bio4: 48.1 %) y para la variedad *apulcensis*, la temperatura media del mes más húmedo (Bio8: 40.0 %). Para especies de distribución restringida, la altitud influye más que la temperatura (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016; García-Aranda *et al.*, 2018).

En otros estudios para especies de pino en México, los resultados coinciden, ya que los modelos que incluyen variables de temperatura han contribuido mayormente para determinar el área potencial de especies con distribución amplia; además, dichas especies coinciden con lo reportado en este estudio, ya que su área de idoneidad se ha localizado principalmente en el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015; Cruz-Cárdenas *et al.*, 2016; Reynoso *et al.*, 2018; Manzanilla-Quiñones *et al.*, 2019). En general, las variaciones en el ajuste del modelo y de la distribución potencial de la especie dependen del tipo de variable bioclimática, la escala y el número de registros de la especie modelada (García-Aranda *et al.*, 2018).

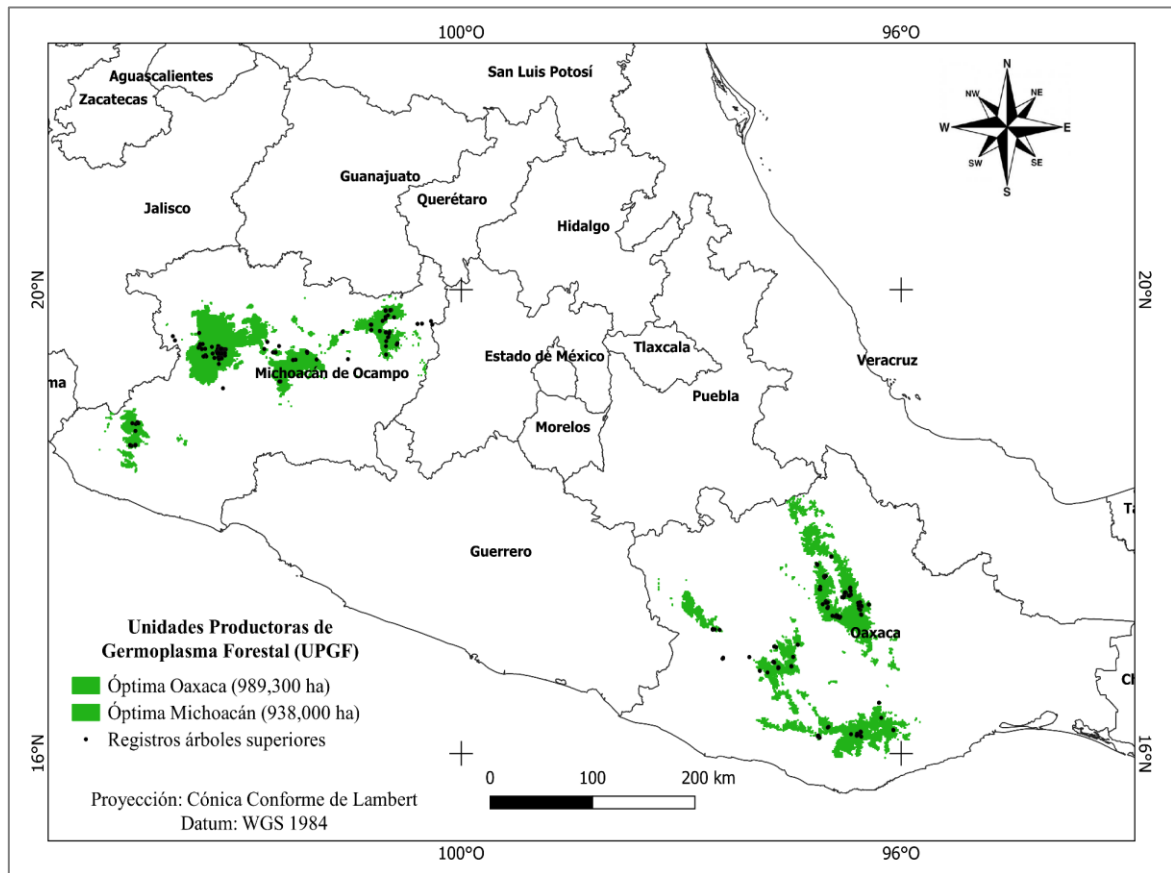
### 2.3.2. Áreas óptimas para el establecimiento de UPGF y selección de los mejores individuos

Ambas variedades tienen zonas de distribución potencial similares, por ejemplo, la variedad *pseudostrobus* se desarrolla principalmente de 2,200 a 2,800 msnm, con excepciones desde 1,650 a 2,200 msnm y más de 2,800 a 3,400 msnm; por su parte, la variedad *apulcensis* se desarrolla óptimamente de 2,400 a 2,850 msnm, con excepciones de 1,400 a 2,400 msnm y más 2,850 a 3,300 msnm. La mejor condición con potencial óptimo=1 para la variedad *pseudostrobus* y el establecimiento de UPGF en Michoacán se presentó en el Eje Neovolcánico donde más del 50 % del área se considera como óptima; mientras que en Oaxaca las mejores condiciones para ambas variedades ocurren en la Sierra Madre del Sur ya que más del 70 % del área es idónea para el establecimiento de UPGF y la selección de los mejores individuos.

De acuerdo con el modelo generado, al categorizar las áreas de idoneidad en óptima (1) y no óptima (0) para el establecimiento de UPGF con la variedad *pseudostrobus* en el estado de Michoacán se obtuvo una superficie óptima de 938,000 ha que equivale al 42.6 % de su territorio forestal (2.2 millones de ha). En Oaxaca existen 989,300 ha con potencial óptimo para establecer UPGF con ambas variedades, que representan el 14 % del total de la superficie forestal del estado (7.06 millones de ha) (Figura 4).

Con los datos del modelo y los recorridos de campo permitieron registrar dos UPGF (que corresponden a árboles superiores ya seleccionados; Figura 4), una para el estado de Michoacán con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* localizados en la provincia Eje Neovolcánico, y la otra para Oaxaca con ambas variedades ubicadas en distintas comunidades de la Sierra Juárez de Oaxaca, dentro de la provincia Sierra Madre del Sur. En ambos casos, de acuerdo con los resultados del modelo, el área donde se ubicaron las UPGF fue catalogada como óptima y con potencial

alto para seleccionar en el futuro otros individuos con características sobresalientes o para establecer otras UPGF.



**Figura 4.** Áreas con potencial óptimo para el establecimiento de UPGF con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis*.

Un programa de mejora genética debe iniciar con la selección de los mejores individuos con base en su fenotipo (Zobel y Talbert, 1988); además, se debe enfocar en el aumento y calidad de los árboles y su adaptabilidad a cambios ambientales. Con los resultados obtenidos se puede realizar la planeación del establecimiento de huertos semilleros asexuales con árboles de las zonas de crecimiento óptimo para ambas variedades, como posible estrategia para generar UPGF, pero de mejor calidad genética, que a su vez permitan la conservación *in situ* de ambas variedades. El Eje Neovolcánico y la Serra Madre del Sur han sido reportadas como zonas de idoneidad para la distribución de varias especies del género *Pinus* y *Abies* (incluida la var. *pseudostrobus*) (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015; Cruz-Cárdenas *et*

*al.*, 2016; Martínez-Méndez *et al.*, 2016). El establecimiento de UPGF que permitan la conservación de pinos deben considerar la protección de los rodales forestales actuales, y desarrollar estrategias para el establecimiento de nuevas UPGF que permitan la reintroducción de especies en áreas deforestadas y/o perturbadas, además, es importante considerar los efectos de fragmentación del hábitat y el cambio de uso del suelo (Mantyka-pringle *et al.*, 2012) ya que a menudo se presentan cuando se trata de especies o variedades con distribución amplia (como en este caso) y que se encuentra fuera de áreas sujetas a protección.

*Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *apulcensis* no se encuentran en alguna categoría de riesgo; sin embargo, factores como el aprovechamiento excesivo y disgénico, el cambio de uso de suelo y el aislamiento de poblaciones locales pueden tener como consecuencia el agotamiento de los mejores rodales (Aguirre-Gutiérrez *et al.*, 2015), dando lugar a la fragmentación de hábitats donde estas variedades se desarrollan. De acuerdo con la Norma Mexicana NMXAA-169-SCFI-2016 (Secretaría de Economía, 2016), se requiere de acciones como el establecimiento de UPGF que tengan como objetivo la conservación de los mejores individuos, de importancia ecológica y económica.

Los datos generados en este estudio son los primeros que describen áreas óptimas para incursionar en la selección de individuos sobresalientes con dos variedades de *P. pseudostrobus* en el centro-sur de México donde ambas variedades tienen gran importancia económica, ecológica debido a su distribución, y también a que son utilizadas en la producción de madera aserrada de buena calidad, durmientes, tableros de partículas, madera de construcción, madera para chapa y triplay, celulosa y resina etc., (Farjon & Styles, 1997). Se han reportado diferencias de crecimiento en altura y diámetro entre las dos variedades (Viveros-Viveros *et al.*, 2006) por lo tanto, es conveniente explorar otras áreas de idoneidad y establecer UPGF con el objetivo de mejora genética para los estados de Michoacán y Oaxaca.



Aunque los resultados obtenidos no se enfocan en el análisis del efecto del cambio climático sobre la subsistencia de estas variedades de pino, se puede emplear como base para compensar dichos cambios (Castellanos-Acuña *et al.*, 2018) y servir como fuentes de germoplasma en hábitats que en la actualidad son de mayor altitud (var. *pseudostrobus*) o de mayor humedad (var. *apulcensis*). Es decir, los resultados de este estudio pueden funcionar en escenarios climáticos futuros (probablemente más cálidos y secos) como base en actividades de migración asistida con fines de conservación o restauración de las áreas boscosas de estas variedades tal y como lo señalan Sáenz-Romero *et al.* (2009) y Castellanos-Acuña *et al.* (2018).

## 2.4. CONCLUSIONES

Las variables bioclimáticas que mayor influencia ejercieron en la distribución potencial para el modelo de la variedad *pseudostrobus* son la estacionalidad de la temperatura (Bio4: 48,1 %) y la temperatura media del cuatrimestre más cálido (Bio10: 29,3 %), y para la variedad *apulcensis*, la temperatura media del mes más húmedo (Bio8: 46 %) y la precipitación del cuatrimestre más frío (Bio19: 23,9 %). Por lo tanto, las áreas de mayor idoneidad para estas variedades dependen de la temperatura y la precipitación. Al igual que en otros trabajos, los sitios con mayor distribución potencial para ambas variedades se encontraron en porciones de las provincias fisiográficas Eje Neovolcánico y Sierra Madre del Sur.

El establecimiento de UPGF en las áreas óptimas de distribución de ambas variedades se puede realizar con la finalidad de establecer huertos semilleros asexuales con árboles de las zonas de crecimiento óptimo, como posible estrategia para mejorar la calidad genética de las dos variedades. Los datos generados permiten reducir los tiempos y costos para la selección de los mejores individuos para ser incluidos en programas de mejoramiento genético forestal. También se podrán diseñar planes integrales de gestión en los que se incluyan estrategias de productividad, conservación y restauración para garantizar la distribución continua y amplia de germoplasma de ambas variedades.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Gutiérrez, J., Serna-Chavez, H. M., Villalobos-Arambula, A. R., Perez de la Rosa, J. A., & Raes, N. (2015). Similar but not equivalent: ecological niche comparison across closely related Mexican white pines. *Diversity and distributions*, 21(3): 245-257. DOI: 10.1111/ddi.12268
- Castellanos-Acuña, D., Vance-Borland, K. W., Clair, J. B. S., Hamann, A., López-Upton, J., Gómez-Pineda, E., ... & Sáenz-Romero, C. (2018). Climate-based seed zones for Mexico: guiding reforestation under observed and projected climate change. *New forests*, 49(3): 297-309. DOI: 10.1007/s11056-017-9620-6
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal, MX). 2019. Memoria Documental. Inventario Nacional Forestal y de Suelos. Zapopan, Jalisco, México. Consultado 18 de sep. 2019. Disponible en: [http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/4125CNF-24\\_Infys.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/8/4125CNF-24_Infys.pdf) (mayo de 2020).
- Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., & Martínez-Meyer, E. (2014). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology*, 34(7): 2427-2437. DOI: 10.1002/joc.3848.
- Cruz-Cárdenas, G., López-Mata, L., Silva, J. T., Bernal-Santana, N., Estrada-Godoy, F., & López-Sandoval, J. A. (2016). Potential distribution model of Pinaceae species under climate change scenarios in Michoacán. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 22(2): 135-148. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2015.06.027

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, IT). (2018). El estado de los bosques del mundo-Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. Roma, Italia. FAO. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 153 p.
- Farjon, A., & Styles, B. T. (1997). *Pinus* (Pinaceae). Flora Neotropica Monograph 75. The New York Botanical Garden, Bronx, New York, USA. 291 p.
- Flores, A., López-Upton, J., Rullán-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Alía, R., Sáenz-Romero, C., & Garcia del Barrio, J. M. (2019). Priorities for conservation and sustainable use of forest genetic resources in four Mexican pines. *Forests*, 10(8): 675. DOI: 10.3390/f10080675
- García-Aranda, M. A., Méndez-González, J., & Hernández-Arizmendi, J. Y. (2018). Distribución potencial de *Pinus cembroides*, *Pinus nelsonii* y *Pinus culminicola* en el Noreste de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5(13): 3-13. DOI: 10.19136/era.a5n13.1396
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). (2019). Bases de datos geográficos disponibles para *Pinus pseudostrobus* Lindl var. *pseudostrobus* y *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis* en México. Global Biodiversity Information Facility. Consultado 15 de ago. 2019. Disponible en: <https://www.gbif.org/search?q=Pinus%20pseudostrobus%20var%20apulcensis> (mayo 2020).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). (2019). Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR. Edición 2012. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=modelo+digital+de+elevación> (abril 2020).

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, MX). (2008). Conjunto de datos vectoriales unidades climáticas. Edición 2008. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/default.html#Descargas> (abril 2020).
- Mantyka-pringle, C. S., Martin, T. G., & Rhodes, J. R. (2012). Interactions between climate and habitat loss effects on biodiversity: a systematic review and meta-analysis. *Global Change Biology*, 18(4): 1239-1252. DOI:1365-2486.2011.02593.x
- Manzanilla Quiñones, U., Delgado Valerio, P., Hernández Ramos, J., Molina Sánchez, A., García Magaña, J. J., & Rocha Granados, M. D. C. (2019). Similaridad del nicho ecológico de *Pinus montezumae* y *P. pseudostrobus* (Pinaceae) en México: implicaciones para la selección de áreas productoras de semillas y de conservación. *Acta botánica mexicana*, (126). DOI: 10.21829/abm126.2019.1398
- Martínez-Méndez, N., Aguirre-Planter, E., Eguiarte, L. E., & Jaramillo-Correa, J. P. (2016). Modelado de nicho ecológico de las especies del género *Abies* (Pinaceae) en México: Algunas implicaciones taxonómicas y para la conservación. *Botanical Sciences*, 94(1): 5-24. DOI: 10.17129/botsoci.508
- Osorio-Olvera, L., B. Vijay., B. Narayani., J. Soberón., M. Falconi. (2016). NicheToolbox: a web tool for exploratory data analysis and niche modeling. version 0.2.5.4. Disponible en <http://shiny.conabio.gob.mx:3838/nichetoolb2/> (abril 2020).
- Perret, D. L., Leslie, A. B., & Sax, D. F. (2019). Naturalized distributions show that climatic disequilibrium is structured by niche size in pines (*Pinus* L.). *Global ecology and biogeography*, 28(4): 429-441. DOI: 10.1111/geb.12862

Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). Ecological niches and geographic distributions (MPB-49) (Vol. 56). Princeton University Press, 41 William Street, Princeton, New Jersey 08540. 281 p.

QGIS Development Team. (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. Disponible en: <https://qgis.org/es/site/> (abril 2020).

Radosavljevic, A., & Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of biogeography*, 41(4): 629-643. DOI: 10.1111/jbi.12227

Reynoso-Santos, R., Pérez-Hernández, M. J., López-Báez, W., Hernández-Ramos, J., Muñoz-Flores, H. J., Uicab, C., ... & Reynoso-Santos, M. D. (2018). El nicho ecológico como herramienta para predecir áreas potenciales de dos especies de pino. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(48): 47-68. DOI: 10.29298/rmcf.v8i48.114

Secretaría de Economía. 2016. Declaratoria de vigencia de la Norma Mexicana: Establecimiento de unidades productoras y manejo de germoplasma forestal especificaciones técnicas. NMX-AA-169-SCFI-2016. Diario Oficial de la Federación. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-169-scfi-2016.pdf> (mayo de 2020).

Singh, H., Garg, R. D., Karnatak, H. C., & Roy, A. (2018). Spatial landscape model to characterize biological diversity using R statistical computing environment. *Journal of environmental management*, 206, 1211-1223. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.09.055

Soberón, J. M. (2010). Niche and area of distribution modeling: a population ecology perspective. *Ecography* 33(1): 159-167. DOI: 1600-0587.2009.06074.x

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). (2019). Herbario Nacional MEXU del Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://datosabiertos.unam.mx/IBUNAM:MEXU:104608> (abril 2020).

Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J., & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2): 121-126.

Worldclim. (2019). Worldclim versión 2.1. Datos climáticos históricos. Disponible en <https://www.worldclim.org/data/worldclim21.html> (abril 2020).

Zobel, B. J. & Talbert, J. T. (1988). Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. México, DF. México. Ed. Limusa. 545 p.

### **CAPÍTULO III: INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES EN EL CRECIMIENTO Y SUPERVIVENCIA EN INJERTOS DE *Pinus pseudostrabus* var. oaxacana (Mirov) Harrison.**

#### **RESUMEN**

Los injertos permiten multiplicar íntegramente las características fenotípicas y genotípicas de árboles genéticamente superiores. El objetivo fue determinar la influencia de la época de injertado, tipo de injerto, el origen de la yema y la preparación del portainjerto, en el prendimiento, crecimiento y supervivencia de injertos intraespecíficos en *Pinus pseudostrabus* var. oaxacana (Mirov) Harrison. Se determinó el efecto de cuatro factores: (a) dos procedencias de las yemas, (b) tres tipos de portainjerto, (c) tres épocas de injertado, y (d) dos métodos de injertado. Durante un periodo de 90 días se evaluaron el prendimiento (PI), crecimiento del brote (Cb) y el porcentaje de supervivencia. Se realizó un análisis de varianza junto con la prueba de Log-Rank para determinar el efecto de los factores a, b, c y d en el PI, Cb y supervivencia. Se obtuvieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) únicamente para los factores a, c y d. Los injertos realizados durante el invierno (diciembre 2018 y febrero 2019) con el método de enchapado lateral y yemas procedentes de Santa Catarina Ixtepeji presentaron los valores más altos de PI ( $\geq 25.5\%$ ), Cb ( $\geq 14.5$  cm) y supervivencia ( $\geq 20.5\%$ ). La supervivencia final disminuyó de 100 a 25% a 90 días del injerto. La época de injertado, origen de las yemas y el tipo de injerto, por separado o en interacción, son factores determinantes para el éxito de los injertos con *P. pseudostrabus* var. oaxacana.

**Palabras clave:** Prendimiento; supervivencia; crecimiento; época de injertado; tipo de injerto.

## INFLUENCE OF SOME FACTORS IN THE GROWTH AND SURVIVAL IN GRAFT OF *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison.

### ABSTRACT

The grafts allow to fully multiply the phenotypic and genotypic characteristics of genetically superior trees. The objective was to determine the influence of the season of grafting, the type of graft, the origin of the scions and the preparation of the rootstock, in the success, growth and survival of intraspecific grafts in *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mirov) Harrison. The effect of four factors was determinate: (a) two provenances of the scions, (b) three types of rootstock, (c) three season of grafting, and (d) two methods of grafting. During a period of 90 days, were evaluated the success (PI), growth of the shoot (Cb) and the percentage of survival. An analysis of variance was performed together with the Log-Rank test to determine the effect of factors a, b, c and d on PI, Cb and survival percentage. Significant differences ( $p \leq 0.05$ ) were obtained only for factors a, c and d. Grafts made during the winter (December 2018 and February 2019) with the lateral method and scions from Santa Catarina Ixtepeji had the highest values of PI ( $\geq 25.5\%$ ), Cb ( $\geq 14.5$  cm) and survival ( $\geq 20.5\%$ ). Final survival decreased from 100 to 25% to 90 days after grafting. The season of grafting, the origin of the scions and the type of graft, separately or in interaction, are determining factors for the success of grafts with *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

**Key words:** Success; survival; growth; grafting season; graft type.



### 3.1. INTRODUCCIÓN

Los bosques naturales han sido aprovechados intensiva y extensivamente durante siglos con métodos disgénicos, lo cual ha producido una reducción en su calidad y variabilidad genética (Vargas-Hernández *et al.*, 2004). La recuperación de su potencial productivo se puede lograr a través de técnicas silvícolas y herramientas de mejora genética (Flores *et al.*, 2019). Las plantaciones forestales comerciales (PFC) permiten solucionar problemas de baja productividad forestal ya que incrementan la producción maderable más allá de lo que pueden generar los bosques naturales manejados (FAO, 2019). A nivel mundial, las especies del género *Pinus* son las más utilizadas en el establecimiento de PFC debido a su alta rentabilidad económica y comercial (FAO, 2018).

En México existen 49 de las 120 especies reconocidas del género *Pinus* (Farjon, 2008); la gran diversidad climática, topográfica y biológica del país resalta la importancia de la apropiada elección de la especie y la variedad al momento de establecer PFC (Gernandt & Perez de la Rosa, 2014). La selección adecuada del material genético recolectado aumenta la supervivencia, producción y rendimiento de las plantaciones (Flores *et al.*, 2019). Sin embargo, hasta ahora los programas de PFC en México utilizan fuentes de semilla sin considerar la calidad genética o el origen de los individuos (CONAFOR, 2019). Para lograr el éxito en las PFC, es necesario contar con un suministro suficiente de germoplasma que genere plantas de crecimiento superior al de los bosques naturales (Zobel & Talbert 1988).

En el país, existe el interés por desarrollar programas de mejoramiento con especies nativas a través de la selección de individuos con las mejores características fenotípicas, la principal finalidad es conservar los individuos mejor adaptados y con el mayor rendimiento productivo para trabajos de reforestación, restauración y plantaciones comerciales (CAMCORE, 2008; CONAFOR, 2019). El mejoramiento genético con especies forestales se realiza en plantaciones especiales llamadas huertos semilleros asexuales (HSA) y bancos clonales (BC). En los HSA, la semilla

genéticamente mejorada se produce a través de polinización abierta o controlada (Stewart *et al.*, 2016), y en los BC es posible producir clones idénticos a través de la propagación vegetativa (PV) (Oliveira *et al.*, 2018; Sevik & Topacoglu, 2015). El injerto es el método de propagación vegetativa más utilizado para establecer HSA y BC con especies del género *Pinus*, ya que permite la multiplicación de árboles adultos con características superiores (Pérez-Luna *et al.*, 2020; Stewart *et al.*, 2016; Vargas-Hernández & Vargas-Abonce, 2016; Wang, 2011).

Un injerto es la unión de dos plantas, el portainjerto (planta patrón) y la yema o brote, de diferente origen (Darikova *et al.*, 2013; Wang, 2011). Los injertos pueden ser intraespecíficos (yema y portainjerto de la misma especie) o interespecífico (yema y portainjerto de diferentes especies) (Opoku *et al.*, 2019), ambos utilizados en coníferas. Esta técnica permite multiplicar el genotipo de árboles adultos con características deseables, como velocidad de crecimiento, rectitud del fuste, vigor, resistencia a plagas y enfermedades, entre otras (Zobel & Talbert, 1988; Vargas *et al.*, 2004; CONAFOR, 2017; Flores *et al.*, 2017; Ranjith e Ilango, 2017).

Las técnicas de injertado enchapado lateral y fisura terminal son las más utilizadas en trabajos con especies del género *Pinus* (Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; González, 2017; Pérez-Luna *et al.*, 2019 y 2020). Aunque en muchos casos el éxito del injerto ha sido alto (>50% supervivencia), para *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* se ha obtenido diferente grado de éxito de acuerdo con las condiciones particulares del trabajo y las características del material utilizado (Barbosa *et al.*, 1984).

Existen pocos estudios disponibles sobre las técnicas de producción de portainjertos en especies de pino. Sin embargo, algunos estudios han determinado la importancia que tiene el portainjerto en el prendimiento, la supervivencia y el vigor de los injertos (Frey *et al.*, 2010 y 2011; Darikova *et al.*, 2013; Kita *et al.*, 2018; Świerczyński *et al.*, 2018).

Por otra parte, se ha mencionado que los injertos realizados a principios del invierno presentan mayor prendimiento que los realizados en primavera. Además, el método de injertado influye en el éxito y crecimiento posterior de los injertos (Frey *et al.*, 2010 y 2011; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; Kita *et al.*, 2018; Pérez- Luna *et al.*, 2019).

La calidad de las yemas recolectadas, y especialmente el lugar de procedencia (árboles selectos o superiores), la edad de la planta madre y el período de almacenamiento de las yemas hasta su injertado, son factores que también determinan el éxito y vigor de los injertos (Viveros-Viveros & Vargas-Hernández, 2007; Frey *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; González, 2017). Las condiciones climáticas post-injerto también es un factor muy importante (Koepke & Dhingra, 2013; Reig *et al.*, 2018; Świerczyńsk *et al.*, 2018).

Por lo tanto, se planteó que existen diferencias de crecimiento, prendimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* dependiendo de los factores externos e internos involucrados, así como de las técnicas de manejo y características propias de los individuos utilizados. El objetivo del presente trabajo fue determinar la influencia de la época de injertado, el tipo de injerto, el origen del material vegetativo y la preparación de la planta portainjerto en el prendimiento, crecimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

## 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el vivero forestal del Campo Experimental (CE) Uruapan, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Michoacán, Méx. Para reducir la temperatura dentro del vivero, se colocó malla media sombra con un 50% de retención de luz.

### 3.2.1. Origen y preparación de los portainjertos

La semilla para producir el portainjerto fue recolectada en rodales naturales de árboles de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* en dos localidades de Oaxaca, México., Santa Catarina Ixtepeji y Santa María Jaltianguis. En los sitios no se observaron evidencias de hibridación natural, por lo que la planta portainjerto producida se consideró como árboles puros de dicha variedad.

Los portainjertos crecieron durante 10 meses en contenedores de plástico de 310 cm<sup>3</sup> en un sustrato formado por la mezcla de turba, vermiculita y perlita en proporción 2:1:1, respectivamente; posteriormente, se trasplantaron a bolsa de polietileno negro calibre 400 con capacidad de 5.2 L (20 cm de ancho y 35 cm de largo) en un sustrato de tierra de monte (Andosol 80%) y corteza de pino molida (20%); los portainjerto utilizados recibieron tres diferentes dosis de fertilización; 3, 5 y 8 kg de fertilizante de liberación controlada Multicote® 15-7-15+2MgO + micronutrientes, por metro cúbico de sustrato, respectivamente.

Al momento del injerto, los portainjertos tenían 1.5 años; con altura promedio de 136.2 cm y diámetro en la base del tallo (D) de 14.0 mm (caso de portainjertos con 3 kg de fertilizante/m<sup>3</sup> de sustrato); por su parte, los de 5 kg de fertilizante/m<sup>3</sup> tenían altura promedio de 143.5 cm y D=15.4 mm, y los producidos con 8 kg de fertilizante/m<sup>3</sup> alcanzaron una altura promedio de 148.0 cm y D=16.9 mm (Figura 5).



**Figura 5.** Características de la planta portainjerto producida con tres diferentes dosis de fertilización; 3, 5 y 8 kg de Multicote® 15-7-15+2MgO + micronutrientes (listones de color naranja, amarillo y blanco, respectivamente) en el CE. Uruapan, INIFAP.

### 3.2.2. Recolección de yemas

Las yemas para injertar fueron recolectadas de árboles seleccionados con el método de comparación entre vecinos, propuesto por Zobel y Talbert (1988), en los terrenos de las comunidades donde se recolectó la semilla para la producción de portainjertos. En cada época de injertado se recolectó un promedio de 120 yemas por localidad. La edad promedio de los árboles donadores fue 43.5 años, con un diámetro de 53.5 cm y altura promedio de 35 m.

Se cortaron yemas sanas de la parte media-superior de la copa de los árboles seleccionados con longitud promedio de 18 a 20 cm y calibre de 10 a 15 mm, para facilitar la unión con el portainjerto, durante cada época de injertado. Las yemas fueron colocadas en hieleras etiquetadas, recubiertas con aserrín deshidratado, franelas húmedas y hielo, y se transportaron al vivero del CE Uruapan donde se injertaron 24 horas después de su colecta (Figura 6).



**Figura 6.** Colecta de yemas terminales de árboles selectos de *P. pseudostrobus* var. oaxacana para su posterior injertado. a) árboles donadores, b) selección y etiquetado de yemas, c) preparación y acomodo de yemas, d) recubierta de yemas para su transporte, y e) dimensiones promedio de las yemas recolectadas.

### 3.2.3. Método de injertado

Se utilizó la metodología descrita por Muñoz *et al.* (2011 y 2013), con dos tipos de injertado: el de enchapado lateral y el de fisura terminal; la altura promedio de injertado fue de 19.3 cm y de 74.5 cm, respectivamente. A continuación, se describe el proceso de ambas técnicas:

*Injerto de fisura terminal:* primero se cortó el brote líder del portainjerto con tijeras para podar, de un solo corte, firme y continuo sin dañar la parte baja, que es donde se llevará a cabo la unión del injerto. Sin embargo, se presentaron dos situaciones: 1) en aquellos patrones que presentaban yema terminal dominante, el corte se realizó a la base de esta, entre la región lignificada y la que no lo está, por encima del último verticilo y 2) para portainjertos con ramas dominantes apicales, en el último verticilo se hizo un corte en la parte inferior de este (Figura 7a).

Posteriormente, a partir del punto donde se retiró la yema principal de 5-10 cm hacia abajo, se removieron las acículas, y se realizó un corte vertical central de 5 cm con la navaja para injertar (Figura 7b); en la hendidura se colocó la yema previamente preparada a la cual se le hicieron dos cortes continuos opuestos a su base en forma de bisel (cuña o V) aproximadamente de 5 cm (Figura 7c), tratando de obtener una superficie sin curvaturas con un solo plano en ambos lados y dejando a la vista el cambium; luego se colocó la yema hasta el final de la hendidura previamente hecha en el tallo principal del portainjerto, esto con el fin de evitar espacios vacíos y favorecer una conexión continua del cambium, donde lo más importante fue hacer coincidir ambas estructuras (Figura 7d), generalmente el diámetro de la yema fue menor que el del portainjerto, por lo tanto, se hizo coincidir con una parte cambial de este.



**Figura 7.** Etapas del injerto de fisura terminal realizado en *P. pseudostrobus* var. oaxacana. a) corte de brote líder del portainjerto, b) corte vertical central al portainjerto, c) preparación de la yema, d) unión del injerto, e) recubrimiento del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan, y g) colocación de etiqueta y bolsa de papel estraza.

Para favorecer la unión, ambas estructuras se recubrieron con una cinta plástica (hule cristal No. 4 de 1 cm de ancho), helicoidalmente hacia arriba y sin dejar espacios descubiertos, hasta llegar al empalme yema-portainjerto se amarró y cortó el sobrante de la cinta, este amarre se realizó para cubrir herméticamente y evitar la deshidratación del punto de unión (Figura 7e).

Finalmente, los injertos se protegieron con una bolsa de plástico con pequeñas perforaciones, para ello se sujetó a 5 cm debajo del amarre del injerto, en la bolsa se agregó 150 ml de agua con Captan 50 ® (2 gr/L) (Figura 7f), esto se realizó con la finalidad de evitar la deshidratación y prevenir problemas por hongos en ambas estructuras; posteriormente, la bolsa plástica fue cubierta con una bolsa de papel estraza, con la finalidad de disminuir la radiación solar y evitar la transpiración de la nueva unión; ambas bolsas se sujetaron a un tutor de madera (Figura 7g), y después de 30 días del injerto se retiraron.

*Injerto de enchapado lateral:* previamente a realizar el injerto, la planta portainjerto se habilitó, ya que se removieron acículas y pequeñas ramas entre los 20 y 30 cm de la base (Figura 8a). Posteriormente se realizó un corte paralelo al tallo sin llegar al centro, dejando una lengüeta, para que entre estas dos partes se colocara la yema (Figura 8b).

Para la preparación de la yema se realizó un corte de un solo tajo evitando curvaturas y rasgaduras, entre 5-6 cm de largo, además, en la base se hizo otro corte opuesto de 5 mm formando una cuña (Figura 8c); al portainjerto se le realizó un corte paralelo de 8 a 10 cm (Figura 8d). Este corte permitió el descanso de la yema en el portainjerto, posteriormente el injerto se recubrió con plástico haciendo un amarre helicoidal de abajo hacia arriba (Figura 8e) cuidando que no existieran entradas de aire y que entre ambas estructuras existiera contacto del cambium, finalmente se colocaron ambas bolsas de protección, y de la misma manera que en el injerto de fisura terminal se retiraron a los 30 días después del injerto (Figura 8f); en ambos casos todos los injertos fueron etiquetados para su evaluación.





**Figura 8.** Etapas del injerto de enchapado lateral realizado en *P. pseudostrobus* var. oaxacana. a) limpieza a la base del portainjerto, b) corte de lengüeta en portainjerto, c) preparación de la yema para injertar, d) corte paralelo del portainjerto, e) recubrimiento y amarre del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan y colocación de etiqueta y bolsa de papel estraza.

### 3.2.4. Época de injertado

Los injertos fueron realizados en tres épocas distintas: a principios del invierno, en diciembre de 2018 (época uno); a finales del invierno, en febrero de 2019 (época dos); y a principios del verano, en julio de 2019 (época tres). En cada época de injertado se realizaron 108 injertos, 54 de cada tipo. Se realizaron un total de 324 injertos durante las tres épocas de injertado.

### 3.2.5. Variables evaluadas

Para evaluar el prendimiento del injerto (PI) se utilizaron los criterios señalados por Muñoz *et al.* (2013) que incluye tres categorías: a) injertos sin prendimiento o notablemente decaídos (valor de 0), donde aparentemente no se presentó unión funcional del cambium de ambas estructuras, b) injertos prendidos y con respuesta (valor de 1), donde el injerto presentó la formación de acículas nuevas, la brotación o rompimiento de la yema y el crecimiento del brote (Cb), y c) injertos prendidos sin respuesta, donde se incluyeron aquellos injertos que aún no presentaban formación de nuevas estructuras, sin embargo, seguían vigorosos (Figura 9). El PI se registró desde 30 y hasta 90 días después del injerto (ddi).



**Figura 9.** Prendimiento en injertos terminales y laterales en *P. pseudostrobus* var. oaxacana. a) injerto muerto, b). injerto con prendimiento y crecimiento del brote y c) injerto prendido sin crecimiento.

Se midió el crecimiento del brote (Cb) con ayuda de un vernier digital marca Neíko y una regla graduada en centímetros, previamente, se hizo una medición inicial de la longitud de la yema al momento de realizar los injertos, las demás evaluaciones se realizaron a los 45, 60 y 90 ddi, y se determinó el Cb solo para aquellos injertos que presentaron prendimiento y crecimiento. Para que la medición fuera más precisa se colocó en las yemas un punto de referencia.

La supervivencia de los injertos se registró cada tercer día, desde los 3 hasta los 90 ddi. Para evaluar la supervivencia, los injertos muertos se codificaron como cero y los vivos como uno. De manera complementaria y para determinar su efecto en el éxito del injerto se registró la longitud y diámetro de la yema, altura total y diámetro en la base del tallo del portainjerto, y altura de injertado.

### 3.2.6. Diseño experimental y análisis estadístico

Se evaluaron 4 factores con diferentes niveles cada uno de ellos: (a) procedencia de las yemas, con dos niveles; (b) portainjerto, con tres niveles; (c) época de injertado, con tres niveles; y (d) método de injertado, con dos niveles. Se utilizó un arreglo factorial 2 x 3 x 3 x 2 en un diseño experimental completamente al azar, con nueve repeticiones por tratamiento; cada injerto representó una unidad experimental.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los factores y sus interacciones en relación con los valores de PI y Cb; el ANOVA para ambas variables se realizó con los datos de la evaluación a los 90 ddi, con el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + AB_{ij} + AC_{ik} + AD_{il} + BC_{jk} + BD_{jl} + CD_{kl} + ABC_{ijk} + ABD_{ijl} + ACD_{ikl} + BCD_{jkl} + ABCD_{ijkl} + \epsilon_{ijklm}$$

Donde:

$Y_{ijklm}$  = valor variable respuesta de la repetición  $l$  del nivel  $i$  de  $A$ , nivel  $j$  de  $B$ , nivel  $k$  de  $C$  y nivel  $l$  de  $D$ .

$\mu$  = media general.

$A_i$  = efecto del nivel  $i$  del factor  $A$  (procedencia de la yema),

$B_j$  = efecto del nivel  $j$  del factor  $B$  (preparación de portainjerto),

$C_k$  = efecto del nivel  $k$  del factor  $C$  (época de injertado),

$D_l$  = efecto del nivel  $l$  del factor  $D$  (tipo de injerto),

$AB_{ij}$  = interacción  $A*B$ , correspondiente al nivel  $i$  de  $A$  y nivel  $j$  de  $B$ ,

$AC_{ik}$  = interacción  $A*C$ , correspondiente al nivel  $i$  de  $A$  y nivel  $k$  de  $C$ ,

$AD_{ij}$ = interacción A\*D, correspondiente al nivel  $i$  de A y nivel  $l$  de D,  
 $BC_{jk}$ = interacción B\*C, correspondiente al nivel  $j$  de B y nivel  $k$  de C,  
 $BD_{jl}$ = interacción B\*D, correspondiente al nivel  $j$  de B y nivel  $l$  de D,  
 $CD_{kl}$ = interacción C\*D, correspondiente al nivel  $k$  de C y nivel  $l$  de D,  
 $ABC_{ijk}$ = interacción A\*B\*C, correspondiente al nivel  $i$  de A, nivel  $j$  de B y nivel  $k$  de C,  
 $ABD_{ijl}$ = interacción A\*B\*D, correspondiente al nivel  $i$  de A, nivel  $j$  de B y nivel  $l$  de D,  
 $ACD_{ikl}$ = interacción A\*C\*D, correspondiente al nivel  $i$  de A, nivel  $k$  de C y nivel  $l$  de D,  
 $BCD_{jkl}$ = interacción B\*C\*D, correspondiente al nivel  $j$  de B, nivel  $k$  de C y  $l$  de D,  
 $ABCD_{ijkl}$ = interacción A\*B\*C\*D, correspondiente al nivel  $i$  de A, nivel  $j$  de B, nivel  $k$  de C y nivel  $l$  de D,  
 $\epsilon_{ijklm}$ = error experimental correspondiente a la repetición  $m$  del nivel  $i$  de A,  $j$  de B,  $k$  de C y  $l$  de D.

Previo al ANOVA, los datos de PI se transformaron con la función arcoseno de la raíz cuadrada del valor original expresado en fracción decimal [ $T = \arcseno(\sqrt{Y})$ ]. Después del análisis los valores promedio se transformaron nuevamente a las unidades originales. Cuando se presentaron diferencias significativas, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey ( $p=0.05$ ). La dinámica de la supervivencia para los cuatro factores se analizó mediante la prueba Log-Rank a partir de curvas de supervivencia construidas por el método Kaplan-Meier, para ello fue necesario codificar los injertos muertos como cero y a los vivos como uno. La función de supervivencia se define como:

$$S(t) = P(T > t).$$

Donde:

$S(t)$  = es la probabilidad de que una muerte ocurra en un tiempo  $T$ ;

$P$  = es la probabilidad de supervivencia en los diferentes intervalos de tiempo durante la evaluación;

$T$ = es el tiempo total de supervivencia hasta el final de la evaluación, que debe ser mayor que  $t$ ,

$t$  = es el tiempo en cualquier momento desde el comienzo de la evaluación (Kaplan y Meier, 1958). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistica ver 13.0 (Statistica, 2018).

### 3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.3.1. Prendimiento del injerto (PI)

La formación de acículas nuevas, estructuras florales y brotación de yemas se manifestó desde los 45 días después de injertado (ddi), lo cual fue indicativo de la actividad y prendimiento (PI) de los injertos. Se obtuvieron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) para la procedencia de la yema, la época y el método de injertado; y también para algunas de sus interacciones (Cuadro 5).

**Cuadro 5.** Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de cuatro factores en el prendimiento (PI) y crecimiento del brote (Cb) de los injertos en *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

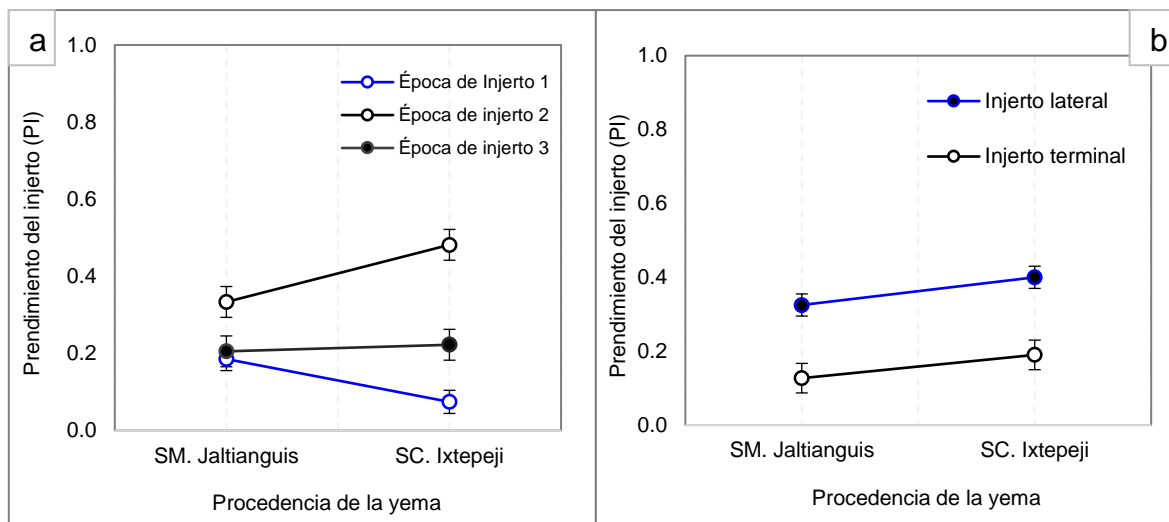
Fuente de variación	GI	Valor de probabilidad (P)	
		PI	Cb
(a) Procedencia de la yema	1	0.0174	0.9085
(b) Portainjerto	2	0.6697	0.9667
(c) Época de injertado	2	<0.0001	<0.0001
(d) Tipo de injerto	1	<0.0001	<0.0001
Procedencia x Portainjerto	2	0.5547	0.6673
Procedencia x Época de injertado	2	0.0413	0.2198
Procedencia x Tipo de injerto	1	0.0402	0.0837
Portainjerto x Época de injertado	4	0.1373	0.4719
Portainjerto x Tipo de injerto	2	0.6966	0.2509
Época de injertado x Tipo de injerto	2	0.9266	0.8817
Procedencia x Portainjerto x Época de injertado	4	0.7741	0.6538
Procedencia x Portainjerto x Tipo de injerto	2	0.4950	0.6995
Procedencia x Época de injertado x Tipo de injerto	2	0.9266	0.8123
Portainjerto x Época de injertado x Tipo de injerto	4	0.2094	0.0580
a x b x c x d	4	0.3684	0.2147

Los injertos realizados mediante la técnica de enchapado lateral presentaron en promedio  $38 \pm 0.03\%$  de PI y los de fisura terminal  $15 \pm 0.03\%$ ; el prendimiento aumentó a  $41 \pm 0.04\%$  cuando el injerto se realizó en febrero de 2019, las diferencias

fueron de hasta 27% respecto aquellos injertos realizados en la época uno ( $13 \pm 0.04\%$ ) y tres ( $20 \pm 0.03\%$ ) (Cuadro 6). Durante las tres épocas en que se injertó, la yema que provenía de Santa Catarina Ixtepeji tuvo mayor éxito ( $26 \pm 0.03\%$ ) que la proveniente de Santa María Jaltianguis ( $23 \pm 0.02\%$ ), en ambas técnicas de injertado, especialmente para injertos laterales (Cuadro 6).

El efecto de la época de injertado se debe a las diferencias en el estado fenológico y fisiológico de la yema; al momento de recolectarse durante la época dos, presentó quiescencia inicial propiciando mayor crecimiento en diámetro (8 a 14 mm) y longitud (12 a 16 cm); también el diámetro del portainjerto (14 a 18 mm) y de la yema (8 a 14 mm), influyó en la unión de ambas estructuras, debido a que el éxito del injerto involucra aspectos morfológicos, anatómicos, fisiológicos y bioquímicos de una planta (Yin *et al.*, 2012). Por lo tanto, cuanto más rápida sea la unión (soldadura) de los tejidos de ambas estructuras, mayor será el éxito y prendimiento, ya que esta eficiencia disminuye el tiempo en que el injerto está en riesgo de deshidratación (Gaspar *et al.*, 2017).

El efecto significativo de la interacción de los factores procedencia de la yema-época de injerto (Cuadro 5, Figura 10a), permitió reforzar los resultados obtenidos, ya que las yemas provenientes de Santa Catarina Ixtepeji injertadas durante la época dos presentaron  $48 \pm 0.04\%$  de éxito del injerto. Por otra parte, la interacción procedencia de la yema-tipo de injerto demostró que el PI es mayor ( $40 \pm 0.03\%$ ) cuando se injerta mediante la técnica de enchapado lateral con yemas procedentes de la misma localidad (Figura 10b, Cuadro 6).



**Figura 10.** Efecto de las interacciones: procedencia de la yema-época de injertado (a) y procedencia de la yema-tipo de injerto (b), en el prendimiento de los injertos en *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* (líneas indican error estándar).

Es común que el prendimiento y la tasa de crecimiento reducida sean causa de la mala calidad de unión yema-portainjerto que a menudo se relaciona con poca formación de callo, causada por un contacto deficiente entre la yema y el portainjerto, o por incompatibilidad intra o interespecífica (Yin *et al.*, 2012; Castro-Garibay *et al.*, 2017). Un factor que favoreció el PI fue la afinidad genética entre púa y patrones, ya que los injertos intraespecíficos son más exitosos por tener mayor similitud, anatómica, morfológica y fisiológica entre los componentes del injerto (Goldschmidt, 2014).

Estos resultados concuerdan con los reportados por Muñoz *et al.* (2013) para injertos intraespecíficos de enchapado lateral con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*, ya que obtuvo un 40% de PI a tres meses ddi, también con los descritos por Pérez-Luna *et al.* (2019) para injertos del mismo tipo, pero con *P. engelmannii* ya que obtuvo un 25% de PI a los seis meses ddi y con los obtenidos por González (2017) con 45% de PI en injertos laterales con *P. leiophylla* a 120 ddi.

### 3.3.2. Crecimiento del brote (Cb)

Se obtuvieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) únicamente para los factores individuales época y método de injertado (Cuadro 6). Los injertos realizados durante la época dos presentaron un crecimiento mayor, de  $14.5 \pm 0.1$  cm (3.3 cm más que las otras épocas), con respecto a los realizados en la época uno con  $11.2 \pm 0.1$  cm y tres con  $11.7 \pm 0.1$  cm. Además, el Cb fue mayor en los injertos de enchapado lateral con  $13.6 \pm 0.1$  cm, respecto a lo observado en injertos de fisura terminal con  $11.4 \pm 0.1$  cm (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) del prendimiento y crecimiento del brote para injertos realizados en *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

Factor	Prendimiento del injerto a 90 ddi (%)	Crecimiento del brote a 90 ddi (cm)
<b>Procedencia (n=162)</b>		
Santa Catarina Ixtepeji	26 $\pm$ 0.1 a	-
Santa María Jaltianguis	23 $\pm$ 0.2 b	-
<b>Época (n=108)</b>		
Época 2	41 $\pm$ 0.1 a	14.5 $\pm$ 0.1 a
Época 3	20 $\pm$ 0.1 b	11.7 $\pm$ 0.1 b
Época 1	13 $\pm$ 0.1 c	11.2 $\pm$ 0.1 b
<b>T. injerto (n=162)</b>		
Enchapado Lateral	36 $\pm$ 0.1 a	13.6 $\pm$ 0.1 a
Fisura Terminal	13 $\pm$ 0.1 b	11.4 $\pm$ 0.1 b

Después del símbolo  $\pm$  se muestra el error estándar.

Las diferencias de Cb entre tipos de injerto se deban a que en los injertos terminales la yema líder fue sustituida, en consecuencia, el portainjerto podría reducir el flujo de agua y nutrientes que requiere para su crecimiento (González, 2017). En cambio, en injertos laterales la parte aérea del portainjerto se retiró en 3 etapas según lo mencionado por Muñoz *et al.* (2013) y, por lo tanto, las nuevas acículas que desarrolló el injerto a los 45 ddi realizaron todas las actividades de fotosíntesis y transpiración. Estas condiciones pueden repercutir y hacer diferencia en el Cb.



Generalmente las diferencias de Cb se deben al hábito de crecimiento de las procedencias y la época en la que se realiza el injerto (Martínez-Ballesta *et al.*, 2010; Koepke & Dhingra, 2013; Świerczyński *et al.*, 2018). De acuerdo con Martínez-Ballesta *et al.* (2010) la formación incorrecta del callo entre yema-portainjerto puede reducir del Cb. utilizar yemas en etapa de quiescencia inicial o receso (época dos), aumentó el crecimiento de la púa injertada, ya que el Cb iniciaba su fase activa (Viveros-Viveros & Vargas-Hernández, 2007). Por otro lado, al utilizar púas en estado de quiescencia post-dormancia (época tres), interrumpió el Cb en el periodo de prendimiento (primeros 45 días) mientras se establecían las conexiones en el punto de unión del injerto.

### 3.3.3. Supervivencia de los injertos

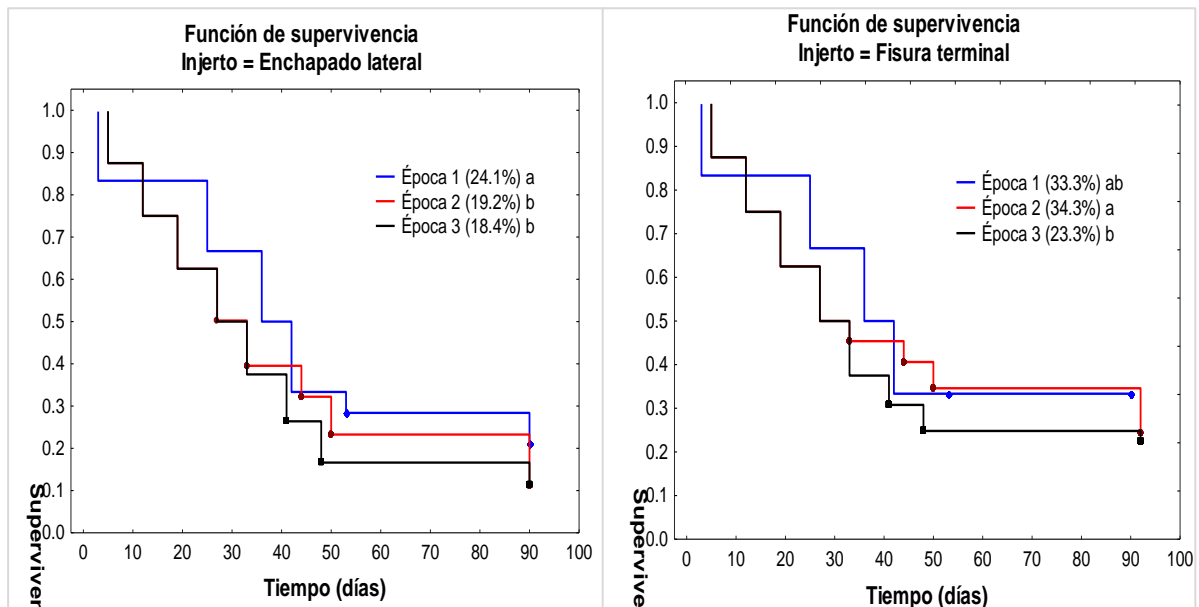
La supervivencia de los injertos se consideró de acuerdo con lo mencionado por varios autores (Muñoz *et al.*, 2013; Cuevas *et al.*, 2015; González, 2017; Pérez-Luna *et al.*, 2019). De manera general para todo el experimento (incluidos todos los tratamientos) la supervivencia fue disminuyendo de 100% hasta 50% a los 40 ddi y 27.9% a los 90 ddi (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Dinámica del porcentaje de supervivencia de los tipos de injerto en *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* realizados en distintas épocas del año.

Época	Enchapado lateral			Fisura terminal		
	Días transcurridos para presentarse supervivencia menor que:			Días transcurridos para presentarse supervivencia menor que:		
	75%	50%	25%	75%	50%	25%
1	25	38	60	25	35	70
2	15	40	90	15	35	90
3	16	26	50	17	27	90

En la prueba Log-Rank se presentaron diferencias estadísticas ( $p < 0.001$ ) únicamente para el tipo de injerto respecto a la época de injertado. El porcentaje de supervivencia promedio a 90 ddi de los injertos laterales fue de 20.5% y para injertos terminales de 30.3%. El mayor porcentaje de mortalidad se presentó durante los primeros 40 días, ya que más del 50% presentaba problemas de prendimiento (Cuadro 7 y Figura 11).

La función de supervivencia estimada con el modelo de Kaplan-Meier, permitió distinguir diferencias significativas a los 90 ddi; el injerto de enchapado lateral presentó 24.1%, 19.2% y 18.4% de supervivencia para la época uno, dos y tres respectivamente y para los injertos de fisura terminal, la supervivencia estimada fue de 33.3%, 34.3% y 23.3% para las épocas uno, dos y tres, respectivamente (Figura 11).



**Figura 11.** Supervivencia estimada con el modelo de Kaplan-Meier para injertos de enchapado lateral (izquierda) y fisura terminal (derecha) en *P. pseudostrobus* var. oaxacana. Valores con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

La mayoría de los trabajos recomiendan injertar coníferas en temporada invernal, ya que se ha demostrado que la época de injerto influye en el porcentaje de éxito y supervivencia de los injertos (Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; Almqvist, 2013; Cuevas *et al.*, 2015; Gaspar *et al.*, 2017; Świerczyński *et al.*, 2018). En un estudio similar con injertos laterales en *P. engelmannii* realizados al final del invierno se obtuvo una tasa de supervivencia de 22.5% a seis meses después del injertado (Pérez-Luna *et al.*, 2019). En otros trabajos, pero con especies latifoliadas al realizar injertos terminales intraespecíficos en *Khaya grandifoliola* C.DC., menciona que la supervivencia incrementó significativamente (81.67%) así como su crecimiento en altura durante el invierno (Opoku *et al.*, 2019).

Con los resultados obtenidos se puede aseverar que la mejor época para realizar injertos en *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* es al final del invierno, durante la época dos (febrero); Gaspar *et al.* (2017) mencionan que es posible injertar con éxito especies leñosas de cualquier parte del mundo en cualquier época del año bajo condiciones climáticas controladas, siempre que la temperatura máxima no sea superior a 24 °C y la mínima inferior a 3 °C.

El método de injertado juega un papel determinante en la supervivencia del injerto, ya que, si el portainjerto y la yema no presentan unión en el cambium, el injerto no tendrá éxito; en este trabajo los injertos laterales presentaron mayor Cb y PI. Aunque los valores promedio de prendimiento y supervivencia fueron bajos y en la mayoría de los factores no hay un efecto interactivo, sí existe un efecto aditivo que aumenta estos valores (hasta 66%), ya que cuando se realizan injertos laterales en portainjertos producidos con 8 kg de fertilizante/m<sup>3</sup>, con yemas de Santa Catarina Ixtepeji, realizados durante la época dos, la supervivencia, el PI y Cb son mayores.

En este sentido, estos resultados, representan un avance en el conocimiento del tema respecto a algunos de los factores determinantes para el éxito de injertos intraespecíficos con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*. En general, se pudo apreciar que el prendimiento y supervivencia del injerto depende principalmente de factores

externos como la ejecución correcta de la técnica de injerto, la época de injertado y el ambiente; pero también se debe a factores internos como las características anatómicas de compatibilidad yema y portainjerto (Martinez-Ballesta *et al.*, 2010; Almqvist, 2013; Darikova *et al.*, 2013; Castro-Garibay *et al.*, 2017; Ranjith e Ilango, 2017; Reig *et al.*, 2018).

### 3.4. CONCLUSIONES

El efecto de la procedencia de la yema, el método y la época de injertado son factores determinantes debido a que influyeron significativamente en el éxito, crecimiento y porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con *P. pseudoastrobus* var. *oaxacana*.

Aunque el valor promedio del prendimiento y supervivencia fue bajo en todo el estudio, y en la mayoría de los factores no hay un efecto interactivo; existe un efecto aditivo que aumenta el prendimiento (>50%) cuando se realizan injertos laterales en portainjertos producidos con 8 kg/m<sup>3</sup> de fertilizante de liberación controlada, con yemas provenientes de Santa Catarina Ixtepeji, realizados al final del invierno (época dos).

La supervivencia del injerto fue disminuyendo conforme pasó el tiempo, pero esta no se relacionó significativamente con la procedencia geográfica de la yema, ni con la preparación del portainjerto; lo que indicó que el porcentaje de supervivencia en injertos intraespecíficos con esta especie está en función de otros factores a los estudiados, que pueden estar relacionados con la compatibilidad fisiológica y anatómica de la yema y el portainjerto.

## BIBLIOGRAFÍA

- Almqvist, C. (2013). Interstock effects on topgraft vitality and strobili production after topgrafting in *Pinus sylvestris*. *Canadian journal of forest research*, 43(6): 584-588. DOI: 10.1139/cjfr-2012-0507
- Barbosa, G, M. G., Alpízar, S., & Fiscal, V. (1984). Pruebas de injertado en *Pinus pseudostrobus* var. oaxacana Mtz. en los altos de Chiapas, 99, 56 p.
- Castro-Garibay, S. L., Villegas-Monter, A., & López-Upton, J. (2017). Anatomy of rootstocks and scions in four pine species. *Forest. Res*, 6: 1–6. DOI: 10.4172 / 2168-9776.1000211
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2017). *Pinus pseudostrobus* Lindl. var. pseudostrobus. SIRE Paquetes Tecnológicos. CONAFOR-CONABIO. México. 7 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/981Pinus%20pseudostrobus.pdf> (mayo de 2020).
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). (2019). Manual para el Establecimiento de Unidades Productoras de Germoplasma Forestal. 86 p. Disponible en: [https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/manual\\_para\\_el\\_estab\\_12bce8a9.pdf](https://backend.aprende.sep.gob.mx/media/uploads/proedit/resources/manual_para_el_estab_12bce8a9.pdf) (abril de 2020).
- Cuevas, C. J. C., Jiménez, C. M., Jasso, M, J., Pérez, R, P., López, U, J., & Villegas, M, Á. (2015). Propagación asexual de *Pinus leiophylla* Schiede ex Schltdl. et Cham. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 21(1): 81-95. DOI: 10.5154/r.rchscfa.2014.08.033
- Darikova, Y. A., Vaganov, E. A., Kuznetsova, G. V., & Grachev, A. M. (2013). Changes in the anatomical structure of tree rings of the rootstock and scion in the heterografts of Siberian pine. *Trees*, 27(6): 1621-1631. DOI: 10.1007/s00468-013-0909-6

- Farjon, A. (2008). *A natural history of conifers*. Editor: Timber Press, London, UK. 304 p.
- Flores L, C., López U, J., & Valencia M, S. (2017). Manual técnico para el establecimiento de ensayos de procedencias y progenies. 154 p. Disponible en: <http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/19/0Manual%20Te%20CC%81cnico%20para%20el%20Establecimiento%20de%20Ensayos.pdf> (mayo de 2020).
- Flores, A., López-Upton, J., Rullán-Silva, C. D., Olthoff, A. E., Alía, R., Sáenz-Romero, C., & García del Barrio, J. M. (2019). Priorities for Conservation and Sustainable Use of Forest Genetic Resources in Four Mexican Pines. *Forests*, 10(8): 675. DOI: 10.3390/f10080675
- Frey, H. H., Frampton, J., Blazich, F. A., Hinesley, L. E. (2010). Grafting Fraser Fir (*Abies fraseri*): effect of grafting date, shade and irrigation. *HortScience*, 45(4): 617–620. DOI: 10.21273/HORTSCI.45.4.617
- Frey, H. H., Frampton, J., Blazich, F. A., Hundley, D., Hinesley, L. E. (2011). Grafting fraser fir (*Abies fraseri*): effect of scion origin (crown position and branch order). *HortScience*, 46(1): 91–94. DOI: 10.21273/HORTSCI.46.1.91
- Gaspar, R. G. B., Wendling, I., Stuepp, C. A., & Angelo, A. C. (2017). Rootstock age and growth habit influence top grafting in *Araucaria angustifolia*. *Cerne*, 23(4): 465-471. DOI: 10.1590/01047760201723042447
- Gernandt, D. S. & Perez-de la Rosa, J. A. (2014). Biodiversity of Pinophyta (conifers) in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 123–133. DOI: 10.7550/rmb.3219

- Goldschmidt, E. (2014). Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications. *Frontiers in plant science*, 5, 1-9. DOI: 10.3389/fpls.2014.00727
- González, J. B. (2017). *Clonación de árboles maduros de Pinus leiophylla Schiede ex Schtdl. Et cham. de un huerto semillero sexual*. Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 80 p.
- Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American statistical association*, 53(282): 457-481.
- Kita, K., Kon, H., Ishizuka, W., Agathokleous, E., & Kuromaru, M. (2018). Survival rate and shoot growth of grafted Dahurian larch (*Larix gmelinii* var. japonica): a comparison between Japanese larch (*L. kaempferi*) and F1 hybrid larch (*L. gmelinii* var. japonica × *L. kaempferi*) rootstocks. *Silvae Genetica*, 67(1): 111-116. DOI: 10.2478/sg-2018-0016
- Koepke, T., and Dhingra, A. (2013). Rootstock scion somatogenetic interactions in perennial composite plants. *Plant Cell Rep* 32, 1321–1327. DOI: 10.1007/s00299-013-1471-9
- Martinez-Ballesta, M. C., Alcaraz-Lopez, C., Muries, B., Mota-Cadenas, C., and Carvajal, M. (2010). Physiological aspects of rootstock scion interactions. *Sci. Hortic*, 127, 112–118. DOI: 10.1016/j.scienta.2010.08.002
- Muñoz, F. H. J., Orozco, G. G., Coria, A. V. M., Toledo, B. R., & Aguilar, G. H. (2011). Validación de dos métodos de injerto de *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Michoacán. Folleto técnico Núm. 24. INIFAP. C.E. Uruapan, Michoacán, México. 43 p.

- Muñoz F. H. J., Ángel J. P. R., Flores A. G., Pineda T. O., y Morales G. E. (2013). Técnicas de injertado enchapado lateral y fisura terminal en *Pinus pseudostrobus* Lindl. Folleto técnico Núm. 68. C. E. Valle del Guadiana Centro de Investigación Regional Norte Centro. Durango, Dgo.48 p.
- Oliveira, K. F., Nogueira, A. C., & Higa, A. R. (2018). Productivity of cones and seeds in a clonal orchard of *Pinus taeda* Linnaeus. *Advances in Forestry Science*, 5(2), 293-298.
- Opoku, E. M., Opuni-Frimpong, E., & Dompreeh, D. (2019). Developing sustainable regeneration techniques for four African mahogany species: grafting methods for success and growth. *New Forests*, 50(4): 539-554. DOI:10.1007/s11056-018-9677-x
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2019). Boletín de noticias: La producción mundial de productos madereros registra el mayor aumento de los últimos 70 años. Disponible en: <http://www.fao.org/news/story/es/item/1256292/icode/> (abril de 2020).
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). El estado de los bosques del mundo (SOFO)- Las vías forestales hacia el desarrollo sostenible. FAO, Roma. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 153 p. Disponible en: <http://www.fao.org/state-of-forests/es/> (mayo de 2020).
- Pérez-Luna, A., Prieto-Ruíz, J. Á., López-Upton, J., Carrillo-Parra, A., Wehenkel, C., Chávez-Simental, J. A., & Hernández-Díaz, J. C. (2019). Some factors involved in the success of side veneer grafting of *Pinus engelmannii* Carr. *Forests*, 10(2): 112. DOI: 10.3390/f10020112



Pérez-Luna, A., Wehenkel, C., Prieto-Ruiz, J. Á., López-Upton, J., & Hernández-Díaz, J. C. (2020). Survival of side grafts with scions from pure species *Pinus engelmannii* Carr. and the *P. engelmannii* x *P. arizonica* Engelm. var. *arizonica* hybrid. *PeerJ*, 8, e8468. DOI: 10.7717/peerj.8468

Programa Internacional para la Conservación y Domesticación de Árboles (CAMCORE). (2008). Boletín de noticias CAMCORE para México y Centroamérica. Universidad Estatal de Carolina del Norte. 2(1), 6. Disponible en: [https://camcore.web00wph.unity.ncsu.edu/files/2015/04/boletincamcore\\_2009\\_2abril.pdf](https://camcore.web00wph.unity.ncsu.edu/files/2015/04/boletincamcore_2009_2abril.pdf) (mayo de 2020).

Ranjith, K. e Ilango, J. V. (2017). Impact of grafting methods, scion materials and number of scions on graft success, vigour and flowering of top worked plants in tea (*Camellia* spp.). *Scientia Horticulturae*, 220, 139-146. DOI: 10.1016/j.scienta.2017.03.039

Reig, G., Zarrouk, O., i Forcada, C. F., & Moreno, M. Á. (2018). Anatomical graft compatibility study between apricot cultivars and different plum based rootstocks. *Scientia Horticulturae*, 237, 67-73. DOI: 10.1016/j.scienta.2018.03.035

Sevik, H., & Topacoglu, O. (2015). Variation and inheritance pattern in cone and seed characteristics of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) for evaluation of genetic diversity. *Journal of Environmental Biology*, 36(5): 1125.

Statistica. (2018). Programa de análisis y visualización de datos. Disponible en: <https://statistica.software.informer.com/13.0/> (marzo de 2020).

Stewart, J. F., Will, R., Crane, B. S., & Nelson, C. D. (2016). Occurrence of shortleaf x loblolly pine hybrids in shortleaf pine orchards: Implications for ecosystem restoration. *Forest Science*, 63(2): 225-231. DOI:10.5849/forsci.15-167

- Świerczyński, S., Kolasiński, M., Urbaniak, M., Stachowiak, A., & Nowaczyk, N. (2018). Influence of rootstock and grafting date on the success and grafts growth of two cultivars of pines. *Horticulture*, 21(4): 06. DOI: 10.30825/5.EJPAU.165.2018.21.4
- Vargas-Hernandez, J. J., & Vargas-Abonce. J. I. (2016). Effect of giberellic acid (GA<sub>4/7</sub>) and girdling on induction of reproductive structures in *Pinus patula*. *Forest systems*, 25(2): e063. DOI:10.5424/fs/2016252-09254
- Vargas-Hernández, J. J., Bermejo-Velazquez, B & Ledig, F.T. (2004). Manejo de Recursos Genéticos Forestales, segunda edición. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México y Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco. 188 p.
- Viveros-Viveros, H., & Vargas-Hernández, J. J. (2007). Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13 (2): 31-135.
- Wang, Y. Q. (2011). Plant grafting and its application in biological research. *Chinese Sci. Bull*, 56, 3511–3517. DOI: 10.1007/s11434-011-4816-1
- Yin, H., Yan, B., Sun, J., Jia, P., Zhang, Z., Yan, X., ... & Liu, H. (2012). Graft-union development: a delicate process that involves cell–cell communication between scion and stock for local auxin accumulation. *Journal of experimental botany*, 63(11): 4219-4232. DOI: 10.1093/jxb/ers109
- Zhang, L., Wang, X. N., Zhang, D. M., Wang, Y. X., Dong, Y. H., Ren, X. G. (2011). Study on grafting of *Abies holophylla* Maxim. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 12, 037.
- Zobel, B. J., & Talbert, J. T. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México DF. Ed. Limusa, 545 p.

## **CAPÍTULO IV: INTERACCIÓN Y COMPATIBILIDAD DE YEMAS Y PATRONES EN INJERTOS RECÍPROCOS DE *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* Y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.**

### **RESUMEN**

La incompatibilidad entre las partes vegetativas involucradas en el injerto determina en gran medida el éxito, además afecta su crecimiento y productividad. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue evaluar la compatibilidad intraespecífica e interespecífica presente en injertos recíprocos con dos variedades de *Pinus pseudostrobus* ya que afecta el éxito y crecimiento de los injertos. Se evaluaron tres factores: (a) dos variedades de *P. pseudostrobus*; (b) tres niveles de interacción y compatibilidad, y (c) ocho procedencias de la yema y portainjerto. Los injertos se realizaron mediante la técnica de fisura terminal y durante un periodo de 90 días después del injerto se evaluó el prendimiento (PI), crecimiento del brote (Cb) y el porcentaje de supervivencia. Para determinar el efecto de los factores estudiados, se realizó un análisis de varianza para las variables PI y Cb, y el análisis de la supervivencia se realizó por el método Kaplan-Meier. A los 90 días del injerto, el prendimiento promedio fue de 37.3%, con crecimiento promedio del brote de 16.7 cm y supervivencia media  $\geq 24\%$ . Al realizar el análisis estadístico, se obtuvieron diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) únicamente para el factor (b), donde los injertos intervarietales (nivel de afinidad 3) presentaron los valores más altos de PI (100%), Cb (24.8 cm) y supervivencia (32.8%). Por lo tanto, es posible realizar injertos intervarietales con yemas de algunos clones de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* injertados en portainjertos de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*, debido a que, si se seleccionan adecuadamente los materiales involucrados en el injerto, se obtiene mayor prendimiento, rápido crecimiento del nuevo brote y un porcentaje alto de supervivencia.

**Palabras clave:** Compatibilidad, interacción, injerto, variedades, *P. pseudostrobus*.

**INTERACTION AND COMPATIBILITY OF SCION AND ROOTSTOCK IN  
RECIPROCAL GRAFT OF *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* AND *P.*  
*pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.**

**ABSTRACT**

The incompatibility between the vegetative parts involved in the graft, largely determines the success, also affects its growth and productivity. Therefore, the objective of the present work was to evaluate the intraspecific and interspecific compatibility present in reciprocal grafts with two varieties of *Pinus pseudostrobus* since it affects the success and growth of the grafts. Three factors were evaluated: (a) two varieties of *P. pseudostrobus*; (b) three levels of interaction and compatibility, and (c) eight provenances of the scion and rootstock. The grafts were carried out using the terminal fissure technique and during a period of 90 days after the graft, the yield (PI), growth of the shoot (Cb) and the percentage of survival were evaluated. To determine the effect of the factors studied, an analysis of variance was performed for the variables PI and Cb, and the analysis of survival was carried out by the Kaplan-Meier method. At 90 days after grafting, the success was 37.3%, with an average growth of the shoot of 16.7 cm and a median survival of  $\geq 24\%$ . When performing the statistical analysis, significant differences were obtained ( $p \leq 0.05$ ) only for factor (b), where the intervarietal grafts (affinity level 3) presented the highest values of PI (100%), Cb (24.8 cm) and survival (32.8%). Therefore, it is possible to perform intervarietal grafts with scion of some clones of *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* grafted into *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*, if the materials involved in the graft are properly selected, greater grasp, rapid growth of the new shoot and a high percentage of survival are obtained.

**Key words:** Compatibility, interaction, grafting, varieties, *P. pseudostrobus*.

## 4.1. INTRODUCCIÓN

La propagación vegetativa mediante injerto garantiza que los rasgos genéticos deseables y de interés en especies forestales se puedan transferir íntegramente (Darikova *et al.*, 2011). El injerto se ha utilizado mayormente en árboles frutales, su implementación en coníferas ha sido cada vez mayor, principalmente en el establecimiento de huertos semilleros clonales (Ahlgren & Wilderness, 1972; Kolegova, 1977; Zobel y Talbert, 1988). El éxito del injerto es mayor, con una yema y portainjerto apropiados, ya que se puede producir un árbol que exhiba las mejores cualidades tanto del portainjerto como de los árboles donadores de yemas (Copes, 1980 y 1999; Kita *et al.*, 2013 y 2018). Por lo tanto, se utiliza para propagar especies difíciles de enraizar (Kita *et al.*, 2018), y para preservar árboles considerados como élite y con estos, establecer bancos clonales (Zobel y Talbert, 1988; Goldschmidt, 2014).

La compatibilidad se puede definir cuando ambas estructuras involucradas en el injerto han producido con éxito la unión y se desarrollan satisfactoriamente como una sola planta (Hartmann y Kester, 1994; Aloni *et al.*, 2010). Sin embargo, no existe una definición precisa de compatibilidad del injerto; generalmente significa que la unión fue exitosa, así como la supervivencia prolongada y el funcionamiento adecuado de la planta compuesta e injertada (Goldschmidt, 2014). En este sentido, la afinidad taxonómica es un requisito previo para la compatibilidad y éxito del injerto (Darikova *et al.*, 2011). En distintos trabajos, se han descrito varios tipos de afinidad entre los injertos, en primer lugar están los homoinjertos (autoinjertos) que suelen ser siempre compatibles; en seguida se encuentran los heteroinjertos o injertos intraespecíficos (yemas y portainjertos pertenecientes a la misma taxa) que son casi siempre compatibles; también existen, injertos interespecíficos (yemas y portainjertos de diferentes especies del mismo género) que rara vez son compatibles; y finalmente, los injertos interfamiliares que siempre presentan incompatibilidad (Mudge *et al.*, 2009; Darikova *et al.*, 2011; Goldschmidt, 2014).

La incompatibilidad entre las partes vegetativas involucradas en el injerto determina en gran medida el éxito y se presenta debido a la falta de unión entre el portainjerto y la yema, ya que afecta el crecimiento y la productividad de la planta nueva (Zarrouk *et al.*, 2010; Goldschmidt, 2014; Castro-Garibay *et al.*, 2017). La formación inicial de la unión en el injerto no garantiza por sí misma la compatibilidad a largo plazo; en ocasiones, la incompatibilidad puede aparecer después de varios años (Mosse, 1962; Wutscher, 1979; Wu *et al.*, 2013; Castro-Garibay *et al.*, 2017; Kita *et al.*, 2013 y 2018). Aunque la incompatibilidad no es un rasgo cuantitativo medible, se pueden diferenciar varios grados de incompatibilidad, desde una leve interferencia con el desarrollo normal del injerto o hasta la mortalidad de alguna o de ambas estructuras (Goldschmidt, 2014). Las fallas más comunes se presentan al momento de elegir los materiales para realizar el injerto, ya que el fracaso se debe principalmente a la falta de coincidencia de los materiales, donde la yema sobrecrece más que el portainjerto o viceversa (Goldschmidt, 2014).

En México *Pinus pseudostrobus* var. *pseudostrobus* Lindl y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* (Mtz), son de gran importancia económica y ecológica debido a su distribución, y también a que son utilizadas en reforestaciones y plantaciones forestales (Viveros-Viveros *et al.*, 2006). Además, se han incorporado en distintos estudios de mejoramiento genético forestal (Viveros-Viveros *et al.*, 2006) y en estudios de propagación vegetativa mediante injertos (Barbosa *et al.*, 1984; Muñoz *et al.*, 2011 y 2013) donde el éxito ha sido diferente en cada caso. Sin embargo, la compatibilidad e incompatibilidad del injerto se ha estudiado poco en especies de coníferas, especialmente en los pinos mexicanos (Castro-Garibay *et al.*, 2017), debido a que la mayoría de los estudios solo se han centrado en injertos intraespecíficos (Muñoz *et al.*, 2011 y 2013; González, 2017; Pérez-Luna *et al.*, 2019), y rara vez se han practicado injertos interespecíficos (Pérez-Luna *et al.*, 2020), en donde no se ha considerado la afinidad de la yema-portainjerto (Castro-Garibay *et al.*, 2017). Por otra parte, la información disponible de la compatibilidad e incompatibilidad en injertos de pino es limitada, ya que la mayoría de los trabajos

que se han desarrollado al respecto son para especies frutales y pocos con otras especies forestales latifoliadas (Kita *et al.*, 2018).

Considerando lo anterior, se planteó que existen diferencias de compatibilidad intraespecífica e interespecífica en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* que expresan mayor prendimiento, mejor crecimiento y un porcentaje alto de supervivencia. Además, es importante conocer los mecanismos de incompatibilidad entre las partes involucradas en el injerto con esta especie y su variedad, para mitigar el problema potencial incluso antes de establecer los injertos en campo. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar la compatibilidad intraespecífica e interespecífica presente en injertos recíprocos con dos variedades de *P. pseudostrobus* que afecta el éxito y crecimiento de los injertos.

## 4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

De la misma manera que en el capítulo anterior, el estudio se llevó a cabo en el vivero forestal del CE. Uruapan, del INIFAP, en Michoacán, Méx. Para reducir la temperatura dentro del vivero, se colocó malla media sombra con un 50% de retención de luz.

### 4.2.1. Origen y preparación de los portainjertos

La semilla para producir la planta portainjerto de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* fue recolectada de árboles superiores ubicados en cuatro localidades de Oaxaca, Santa Catarina Ixtepeji, Santa María Jaltianguis, Teococuilco de Marcos Pérez y San Pedro Yolox. La semilla de la variedad *pseudostrobus* también se recolectó de árboles superiores que se encuentran en tres localidades del estado de Michoacán, Ciudad Hidalgo, Santana Jeráhuaro y Nuevo San Juan Parangaricutiro. En los sitios no se observaron evidencias de hibridación natural, por lo que la planta portainjerto producida se consideró como árboles puros de dicha variedad, y las plantas como progenies deseadas (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Procedencia de la semilla para producir la planta portainjerto de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.

Estado	Árbol superior	Localidad	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (m)
Oaxaca	3	Santa Catarina Ixtepeji	17°10'	96°33'	2,347
	13	Santa María Jaltianguis	17°21'	96°30'	2,367
	38	Teococuilco de Marcos Pérez	17°18'	96°41'	2,495
	45	San Pedro Yolox	17°31'	96°41'	2,536
Michoacán	6	Ciudad Hidalgo	19°36'	100°40'	2,376
	15	Santa Ana Jeráhuaro	19°50'	100°38'	2,560
	62	Santa Ana Jeráhuaro	19°48'	100°37'	2,630
	76	Nuevo San Juan Parangaricutiro	19° 27'	102° 12'	2,665



Durante 10 meses en 2018, los portainjertos crecieron en contenedores de plástico de 310 cm<sup>3</sup> y 54 cavidades, en un sustrato formado por la mezcla de turba, vermiculita y perlita en proporción 2:1:1, respectivamente; posteriormente, se trasplantaron a bolsa de polietileno negro calibre 400 con capacidad de 5.2 L (20 cm de ancho y 35 cm de largo) en un sustrato de tierra de monte (Andosol 60%) y corteza de pino molida (40%); adicionalmente se agregó fertilizante de liberación controlada en proporción de 3 kg de Multicote® 15-7-15+2MgO + micronutrientes, por metro cúbico de mezcla de sustrato. Al momento del injerto (julio de 2019), los portainjertos de ambas variedades tenían 1.5 años; la altura promedio de los portainjertos de la variedad oaxacana fue de 124.5 ± 8.5 cm y diámetro promedio en la base del tallo (D) de 12.5 ± 1.5 mm; por su parte, los portainjertos de la variedad pseudostrobus tenían altura promedio de 133.5 ± 5.5 cm y D=14.4 ± 2.2 mm (Figura 12).



**Figura 12.** Características de la planta portainjerto de *P. pseudostrobus* var. oaxacana y var. *pseudostrobus* producida en el CE. Uruapan, INIFAP. a) trasplante, b) mantenimiento y c) portainjerto de ambas variedades a 1.5 años.

#### 4.2.2. Obtención de las yemas

Las yemas para injertar fueron recolectadas de la misma planta portainjerto que corresponde a progenies deseadas de árboles seleccionados fenotípicamente como superiores en el estado de Michoacán y Oaxaca, para ello se seleccionaron aquellas que cumplían con las características de crecimiento en el brote líder descritas por

Viveros-Viveros & Vargas-Hernández (2007), al momento del injerto fueron retiradas para realizar las combinaciones establecidas en cada nivel de afinidad genética (Cuadro 8); la longitud promedio de estas fue de 14 a 16 cm y calibre de 8 a 12 mm. El corte de la yema se realizó el mismo día que se injertó, posteriormente y antes de injertarse se aplicó una mezcla de 1ml/L de agua de Ridomil Gold ®, para evitar la interacción negativa de hongos en el injerto.

#### **4.2.3. Método de injertado**

En agosto de 2019, todos los injertos se realizaron a través de la técnica de fisura terminal, descrita por Muñoz *et al.* (2011 y 2013), la altura promedio de injertado fue de  $65.5 \pm 5.2$  cm, en ambas variedades. A continuación, se describe la técnica de injertado:

El proceso inició con el corte del brote líder de cada planta, el cual se separó para injertarse como yema en otro portainjerto, de acuerdo con el nivel de afinidad. Para ello fue necesario utilizar tijeras para podar, con las que se realizó un solo corte, firme y continuo sin dañar la parte baja, que es donde se llevó a cabo la unión del injerto (Figura 13a). Posteriormente, a partir del punto donde se retiró la yema principal de 5-10 cm hacia abajo, se removieron las acículas, y se realizó un corte vertical central de 5 cm con la navaja para injertar (Figura 13b); en la hendidura se colocó la yema previamente preparada a la cual se le hicieron dos cortes continuos opuestos a su base en forma de bisel (cuña o V) aproximadamente de 5 cm (Figura 13c), tratando de obtener una superficie sin curvaturas con un solo plano en ambos lados y dejando a la vista el cambium; luego se colocó la yema hasta el final de la hendidura previamente hecha en el tallo principal del portainjerto, esto con el fin de evitar espacios vacíos y favorecer una conexión continua del cambium, donde lo más importante fue hacer coincidir ambas estructuras (Figura 13d), generalmente el diámetro de la yema fue menor que el del portainjerto, por lo tanto, se hizo coincidir con una parte cambial de este.

Para favorecer la unión, ambas estructuras se recubrieron con una cinta plástica (hule cristal No. 4 de 1 cm de ancho), helicoidalmente hacia arriba y sin dejar espacios descubiertos, hasta llegar al empalme yema-portainjerto, se amarró y cortó el sobrante de la cinta, este amarre se realizó para cubrir herméticamente y evitar la deshidratación del punto de unión (Figura 13e).



**Figura 13.** Etapas del injerto de fisura terminal realizado en ambas variedades de *P. pseudostrobus*. a) corte de brote líder del portainjerto, b) corte vertical central al portainjerto, c) preparación de la yema, d) unión del injerto, e) recubrimiento del injerto con cinta plástica, f) amarre y acomodo de bolsa plástica con agua+captan, y g) colocación de etiqueta y bolsa de papel estroza.

Finalmente, los injertos se protegieron con una bolsa de plástico con pequeñas perforaciones, para ello se sujetó a 5 cm debajo del amarre del injerto, en la bolsa se agregó 150 ml de agua con Captan 50® (2 gr/L) (Figura 13f), esto se realizó con la finalidad de evitar la deshidratación y prevenir problemas con hongos en ambas estructuras; posteriormente, la bolsa plástica fue cubierta con una bolsa de papel

estruza la cual se sujetó a un tutor de madera (Figura 13g), ambas bolsas se retiraron a los 30 días después del injertado (ddi).

El manejo posterior al injerto, incluyó riegos cada 3 días y como complemento para prevenir hongos, cada 8 días se realizaron aplicaciones alternadas con Captan 50® en una proporción de 2 gr/L agua, y Ridomil Gold ® en dosis de 1ml/L de agua. El riego y las aplicaciones se realizaron durante todo el tiempo de evaluación del experimento por tres meses (noviembre de 2019).

#### **4.2.4. Combinaciones de injertos por nivel de afinidad**

Para realizar los injertos, se determinaron tres factores de compatibilidad entre progenies selectas de árboles superiores de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*. Los niveles de afinidad fueron los siguientes:

1. Injertos entre patrones y yemas del mismo árbol (homoinjertos) en cada variedad sin importar la procedencia.
2. Injertos con patrones de una familia y yemas de otros clones dentro de una misma variedad (injertos intraespecíficos) de manera que existiera interacción con materiales de diferentes poblaciones o localidades.
3. Injertos con patrones de una familia de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* (Oaxaca) y yemas de otros clones de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* (Michoacán) y viceversa (injertos intervarietales) (Cuadro 9).

Para el primer nivel de afinidad se realizaron ocho combinaciones (cuatro para cada variedad) con seis repeticiones cada una, en el segundo se realizaron 24 combinaciones (12 por variedad) con cinco repeticiones cada una, y en el tercero se realizaron 18 combinaciones (nueve por variedad) con cinco repeticiones cada una (Cuadro 9). Por lo tanto, la proporcionalidad de interacción fue de 4:12:9 dentro del nivel uno, dos y tres respectivamente para cada una de las variedades; en total se realizaron 258 injertos (incluidos todos los niveles de afinidad).

**Cuadro 9.** Combinaciones posibles para cada nivel de afinidad entre progenies selectas de árboles superiores de *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.

Planta portainjerto (patrones)		Árboles donadores de púas								SUMA	
		var. <i>oaxacana</i>				var. <i>pseudostrobus</i>					
		Familia	3	13	38	45	6	15	62	76	
var. <i>oaxacana</i>	3	X 6	+5	+5	+5	*5	*5	5*		36	
	13	+ 5	X6	+5	+5	*5	*5	5*		36	
	38	+5	+5	X6	+5					21	
	45	+5	+5	+5	X6	*5	*5	*5		36	
var. <i>pseudostrobus</i>	6	*5	*5		*5	X6	+5	+5	+5	36	
	15	*5	*5		*5	+5	X 6	+5	+5	36	
	62	*5	*5		*5	+5	+5	X 6	+5	36	
	76					+5	+5	+5	X 6	30	
SUMA			36	36	21	36	36	36	36	30	<b>258</b>

Donde: X= representa las combinaciones y repeticiones del primer nivel de afinidad (color negro), + = combinaciones y repeticiones del segundo nivel de afinidad (color amarillo), y \* = combinaciones y repeticiones del tercer nivel de afinidad (color azul).

#### 4.2.5. Variables evaluadas

Para determinar la interacción y compatibilidad del portainjerto-yema en los injertos realizados en los diferentes grados de afinidad, se evaluó el prendimiento del injerto (PI) mediante los criterios señalados por Muñoz *et al.* (2013) y González (2017) que incluyen dos categorías: a) injertos sin prendimiento o notablemente decaídos (valor de 0), donde aparentemente no se presentó unión funcional del cambium de ambas estructuras, y b) injertos prendidos y con respuesta (valor de 1), donde el injerto presentó la formación de acículas nuevas, la brotación o rompimiento de la yema y el crecimiento del brote (Cb). El PI se registró desde 30 y hasta 90 días después del injerto (ddi).

También se registró el crecimiento del brote (Cb) para ello, se utilizó una regla metálica y un vernier digital marca Neíko; previo a injertar las yemas, se realizó una medición inicial de su longitud (punto de control), las evaluaciones para esta variable se realizaron a los 30, 45, 60 y 90 ddi, el Cb solo se midió en aquellos injertos que presentaron PI. Para que la medición fuera más precisa se colocó en las yemas un punto de referencia, que en cada medición se mantuvo como punto de medida inicial de crecimiento.

Por otra parte, la supervivencia de los injertos, independientemente del nivel de afinidad, se registró cada tercer día, desde los 5 hasta 90 ddi. Para evaluar la supervivencia, a los injertos muertos se les asignó un valor de cero y a los vivos de uno. De manera complementaria y para determinar su efecto en el éxito del injerto se registraron las características del injertado como la longitud y diámetro de la yema, altura total y diámetro en la base del tallo del portainjerto, y altura de injertado.

#### **4.2.6. Diseño experimental y análisis estadístico**

Se evaluaron 3 factores con diferentes niveles cada uno: (a) dos variedades de *P. pseudostrobus*; (b) tres niveles de interacción y compatibilidad, y (c) ocho procedencias para combinaciones yema-portainjerto y viceversa. Se utilizó un arreglo factorial 2 x 3 x 8 en un diseño experimental completamente al azar debido al número de combinaciones y repeticiones por tratamiento; cada injerto representó una unidad experimental. Previo al análisis estadístico, se corrió una prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, en la que los datos en su totalidad mostraron normalidad, con un nivel de significancia mayor al 0.05%.

Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto de los factores y sus interacciones en relación a los valores obtenidos de PI, Cb y las características del injertado; el ANOVA se realizó con los datos de la evaluación a los 90 ddi para el caso de PI y Cb; previo al análisis, los datos de PI se transformaron con la función arcoseno de la raíz cuadrada del valor original

expresado en fracción decimal [ $T = \arccos(\sqrt{Y})$ ]. Después del análisis los valores promedio se transformaron nuevamente a las unidades originales. El ANOVA se realizó con los límites de confianza del 95% y un nivel de significancia  $\alpha=0.05$ , utilizando el siguiente modelo estadístico.

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

$Y_{ijk}$ = valor variable respuesta de la repetición  $l$  del nivel  $i$  de  $A$ , nivel  $j$  de  $B$  y nivel  $k$  de  $C$

$\mu$ = media general.

$A_i$ = efecto del nivel  $i$  del factor  $A$  (variedad),

$B_j$ = efecto del nivel  $j$  del factor  $B$  (nivel de afinidad),

$C_k$ = efecto del nivel  $k$  del factor  $C$  (procedencia de yema-portainjerto),

$AB_{ij}$ = efecto de la interacción  $A*B$ , correspondiente al nivel  $i$  de  $A$  y nivel  $j$  de  $B$ ,

$AC_{ik}$ = efecto de la interacción  $A*C$ , correspondiente al nivel  $i$  de  $A$  y nivel  $k$  de  $C$ ,

$ABC_{ijk}$ = efecto de la interacción  $A*B*C$ , correspondiente al nivel  $i$  de  $A$ , nivel  $j$  de  $B$  y nivel  $k$  de  $C$ ,

$\epsilon_{ijk}$ = error experimental correspondiente a la repetición  $l$  del nivel  $i$  de  $A$ ,  $j$  de  $B$  y  $k$  de  $C$ .

Cuando se presentaron diferencias significativas en alguno de los factores evaluados por separado o interactuando, se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey ( $p=0.05$ ).

La dinámica de la supervivencia para los tres factores evaluados se analizó mediante la prueba Log-Rank a partir de curvas de supervivencia construidas por el método Kaplan-Meier, para ello fue necesario codificar los injertos muertos como cero y a los vivos como uno.

La función de supervivencia se define como:

$$S(t) = P(T \geq t).$$

Donde:

$S(t)$  = es la probabilidad de que una muerte ocurra en un tiempo  $T$ ;

$P$  = es la probabilidad de supervivencia en los diferentes intervalos de tiempo durante la evaluación;

$T$  = es el tiempo total de supervivencia hasta el final de la evaluación, que debe ser mayor que  $t$ ,

$t$  = es el tiempo en cualquier momento desde el comienzo de la evaluación (Kaplan y Meier, 1958).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa Statistica ver 13.0 (Statistica, 2018).

### **4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **4.3.1. Prendimiento del injerto (PI)**

Desde los 35 días después de injertado se manifestó la formación de nuevas acículas, así como el alargamiento y crecimiento de nuevas yemas (Cb), dando como resultado el prendimiento (PI) de los injertos. De manera general y sin considerar el efecto de los factores estudiados el PI en promedio a los 90 días de injertado (ddi) fue de  $37.3 \pm 2.3\%$ . Los resultados del análisis estadístico evidenciaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) solamente para los niveles de interacción y compatibilidad del injerto (Cuadro 10). Los injertos realizados con patrones y yemas del mismo árbol (homoinjertos) en cada variedad y sin importar la procedencia de estos presentaron en promedio PI igual a  $29 \pm 2.2\%$ , por otra parte, los injertos intraespecíficos presentaron un PI de  $33 \pm 2.7\%$  (Cuadro 10).



**Cuadro 10.** Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de tres factores de compatibilidad en el prendimiento (PI) en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.

Afinidad del injerto	Valor de probabilidad (P)	Observaciones	PI (%) a 90 ddi
Nivel 1	<0.001	48	29 ± (0.05) b
Nivel 2	<0.01	120	33 ± (0.04) b
Nivel 3	<0.002	90	50 ± (0.07) a

Donde: Nivel 1= homoinjertos, Nivel 2 = injertos intraespecíficos y Nivel 3= injertos intervarietales con ambas variedades de *P. pseudostrobus*. Entre paréntesis ( ) se muestra el error estándar de la variable PI. El número de observaciones no es igual debido a las combinaciones de los injertos dentro de cada nivel de afinidad. Letras distintas indican diferencias significativas.

El valor más alto de PI fue de 50±1.8% y se presentó en injertos intervarietales, realizados recíprocamente con patrones de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y yemas de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* (Cuadro 10).

Las diferencias de PI entre los niveles de interacción y compatibilidad evidenciaron que se pueden realizar injertos intraespecíficos e intervarietales con ambas variedades de *P. pseudostrobus*; al realizar la prueba de separación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) fue posible identificar el nivel y la combinación que determinaron un mayor éxito de injertado.

En el primer nivel de interacción donde se realizaron homoinjertos; el árbol superior 76 de la variedad *pseudostrobus* de la localidad Nuevo San Juan Parangaricutiro, Mich., presentó el mayor PI, con 83% de éxito, seguido de los injertos del árbol tres de la variedad *oaxacana* con un 67% de éxito procedente de la localidad de Santa Catarina Ixtepeji, Oax., en las demás combinaciones de los árboles 15, 62 y 6 de la variedad *pseudostrobus*, el éxito de injertado se mantuvo entre 17 y 33%, sin embargo, en los injertos realizados con los árboles de la variedad *oaxacana* 13, 38 y 45, el éxito del injerto inesperadamente fue igual a cero (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Comparación de media de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para el prendimiento del injerto (PI) entre los niveles de interacción y afinidad en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*.

1. Homoinjertos (n= 48)		2. Injertos intraespecíficos (n= 120)		3. Injertos intervarietales (n= 90)	
Cruza	PI (%)	Cruza	PI (%)	Cruza	PI (%)
*AS76 X AS76	83 a	*AS3 X AS45	100 a	*AS45 X AS6	100 a
AS3 X AS3	67 b	AS6 X AS76	80 b	*AS3 X AS62	100 a
AS15 X AS15	33 c	AS38 X AS3	60 c	AS3 X AS15	80 b
AS62 X AS62	33 c	AS3 X AS13	40 d	AS6 X AS3	80 b
AS6 X AS6	17 d	AS3 X AS38	40 d	AS62 X AS45	80 b
AS13 X AS13	0 e	AS38 X AS13	40 d	AS45 X AS15	60 c
AS38 X AS38	0 e	AS76 X AS15	40 d	AS45 X AS62	60 c
AS45 X AS45	0 e	AS62 X AS76	40 d	AS62 X AS3	60 c
-	-	AS62 X AS6	40 d	AS13 X AS6	60 c
-	-	AS62 X AS15	40 d	AS3 X AS6	40 d
-	-	AS45 X AS3	40 d	AS6 X AS45	40 d
-	-	AS38 X AS45	40 d	AS13 X AS62	40 d
-	-	AS76 X AS6	40 d	AS15 X AS45	40 d
-	-	AS6 X AS15	20 e	AS13 X AS15	40 d
-	-	AS6 X AS62	20 e	AS15 X AS3	20 e
-	-	AS15 X AS62	20 e	AS15 X AS13	0 f
-	-	AS76 X AS 62	20 e	AS62 X AS13	0 f
-	-	AS45 X AS38	20 e	AS6 X AS13	0 f
-	-	AS13 X AS3	20 e	-	-
-	-	AS13 X AS38	20 e	-	-
-	-	AS13 X AS45	0 f	-	-
-	-	AS45 X AS13	0 f	-	-
-	-	AS15 X AS76	0 f	-	-
-	-	AS15 X AS6	0 f	-	-

\* Diferencia altamente significativas. Letras distintas indican diferencias dentro de cada nivel de afinidad. En las combinaciones (AS X AS), el primer árbol representa al portainjerto, la letra X la cruza, y el segundo árbol es el donador de la yema.

En injertos intraespecíficos (segundo nivel de interacción), el éxito promedio de las interacciones (12 cruzas/variedad) para la variedad *oaxacana* fue 35% y en la variedad *pseudostrobus* de 30%; la combinación del árbol superior (AS) tres (portainjerto) con AS45 (yema) de la variedad *oaxacana* presentó 100% de PI, sin embargo, en la combinación recíproca el éxito disminuyó a 40%.

La combinación AS6 X AS76 (portainjerto y donador de yema, respectivamente) de la variedad pseudostrobus obtuvo 80% de PI y su recíproco solo 40%, en las demás interacciones el éxito se mantuvo de 20-60%, sin embargo, en las combinaciones AS13 X AS45 de la variedad oaxacana y AS15 X AS76 de la variedad pseudostrobus y recíprocamente para ambos casos, no presentaron prendimiento del injerto, debido a que no se formó un callo de unión (Cuadro 11).

Cuando los injertos se realizaron entre variedades (Intervarietales) el PI en promedio fue de 44.3%, sin embargo, los portainjertos de la variedad oaxacana de los AS45 y AS3, injertados con yemas de la variedad pseudostrobus del AS6 y AS62, presentaron 100% de éxito. También AS6 y AS62 funcionan bien como portainjertos, ya que es posible obtener hasta un 80% de PI, en combinación con yemas de otros árboles (P.ej. AS3 y AS45), en los demás injertos intervarietales, el PI fue menor o igual a 60% (Cuadro 11). Por otra parte, se pudo apreciar que el éxito en algunas combinaciones no fue bueno (PI= cero) debido a la compatibilidad anatómica o genética entre las procedencias y variedades de portainjertos y yemas. Los resultados obtenidos permitieron demostrar que existen materiales involucrados en el injerto (yema/portainjerto) que independientemente del nivel de afinidad o interacción no muestran valores significativos de PI, si no lo contrario, ya que en algunas combinaciones reducen el éxito o simplemente no existe prendimiento, tal es el caso del árbol 13 de la variedad oaxacana y 15 de la variedad pseudostrobus.

Sumado a lo anterior, en la mayoría de los estudios se ha señalado que en injertos con afinidad taxonómica estrecha el éxito es mayor, y más si se realizan homoinjertos (Mudge *et al.*, 2009), en este caso los resultados demostraron que los injertos realizados entre árboles de la variedad pseudostrobus son más exitosos (33 a 83%) respecto a los realizados con la variedad oaxacana ( $\leq 17\%$ ); también se ha documentado que las diferencias de edad y la juventud del portainjerto y de la yema afectan notablemente el prendimiento y el desarrollo reproductivo de los injertos (Wang *et al.*, 2011) sin embargo en este estudio las yemas y portainjertos utilizados fueron de la misma edad (1.5 años), de manera que el efecto de la edad de la yema

y portainjerto fue mínimo. Los homoinjertos son importantes cuando se realizan estudios de compatibilidad ya que sirven como punto de control (Flaishman *et al.*, 2008; Goldschmidt, 2014) para detectar variaciones que se presentan al momento de realizar injertos interespecíficos o intervarietales como en este caso.

Los resultados obtenidos, fueron algo inesperados, debido a que cuando se realizaron injertos intraespecíficos (segundo nivel de afinidad) e intervarietales (tercer nivel) el PI fue mayor (40 a 100%), respecto al éxito obtenido en los homoinjertos. Con estos resultados se puede aseverar que el éxito de los injertos con la variedad oaxacana y pseudostrobus es mayor en injertos intervarietales (PI= 100%), seleccionando adecuadamente los portainjertos y yemas para su realización. Al respecto se ha mencionado que la realización de injertos interespecíficos o intervarietales es considerada como una alternativa para incrementar el éxito en la propagación por este medio, sobre todo en especies que son difíciles de injertar con métodos intraespecíficos (Barnes, 2008) como en este caso, las especies del género *Pinus*.

En otros estudios con especies de pino el éxito de injertado con la técnica de fisura terminal ha sido similar al obtenido en este trabajo con injertos interespecíficos, tal y como lo reporta Pérez-Luna *et al.* (2020) con *P. engelmannii* x *P. arizonica* híbrido, donde el éxito fue de 80% en al menos dos de los tratamientos evaluados. También coinciden con los reportados por Kita *et al.* (2018) para injertos interespecíficos de un híbrido de Alerce (*L. gmelinii* var. Japonica x *L. kaempferi*) injertado con yemas de *Larix gmelinii* var. japonica, donde el porcentaje de éxito fue de 83 a 93%. En otro estudio reportado por Lott *et al.* (2003) con la misma técnica en injertos de un híbrido de *P. palustris* Mill. x *P. elliotii* Engelm en portainjertos de *P. palustris* obtuvieron prendimiento de 72% al año de injertado. En este trabajo se consideró que una posible causa del bajo prendimiento en homoinjertos de la variedad oaxacana, se debe a una deficiente unión de la yema/portainjerto, debido a características fisiológicas del material vegetativo, procedente de las distintas localidades; también es posible que el número de canales resiníferos presentes en

esta variedad hayan disminuido el éxito de los injertos, ya que se ha documentado que esto puede influir en éxito del injerto en especies del género *Pinus* tal y como lo mencionan en sus trabajos Pérez-Luna *et al.* (2019) y Castro-Garibay *et al.* (2017).

#### 4.3.2. Crecimiento del brote en injertos vivos (Cb)

Solo para el efecto individual niveles de interacción y compatibilidad, se presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.05$ ), donde los injertos recíprocos (nivel 3) de la variedad oaxacana y la variedad pseudostrobus (injertos intervarietales) alcanzaron un mayor crecimiento con 18.84 cm (hasta 5 cm más respecto al nivel de interacción uno), respecto a injertos intraespecíficos (nivel 2) con 16.46 cm y también para homoinjertos (nivel 1) con 13.73 cm (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Resultados del análisis de varianza (valor de probabilidad, P) del efecto de tres factores de compatibilidad en el crecimiento del brote (Cb) en injertos recíprocos de *P. pseudostrobus* var. oaxacana y *P. pseudostrobus* var. pseudostrobus.

Afinidad del injerto	Valor de probabilidad (P)	Observaciones	Cb (cm) a 90 ddi
Nivel 1	<0.01	48	13.73 ± (0.7) b
Nivel 2	<0.01	120	16.46 ± (0.5) ab
Nivel 3	<0.01	90	18.84 ± (1.0) a

Donde: Nivel 1= homoinjertos, Nivel 2 = injertos intraespecíficos y Nivel 3= injertos intervarietales con ambas variedades de *P. pseudostrobus*. Entre paréntesis ( ) se muestra el error estándar de la variable Cb. El número de observaciones no es igual debido a las combinaciones de los injertos dentro de cada nivel de interacción. Letras distintas indican diferencias significativas.

Las diferencias de Cb entre los niveles de interacción y compatibilidad evidenciaron que se pueden realizar injertos de cualquier tipo con ambas variedades de *P. pseudostrobus*; sin embargo, el Cb en algunas combinaciones por nivel de afinidad

es mayor respecto a otras; al realizar la prueba de separación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ) fue posible identificar en qué nivel y combinación se presentó un buen crecimiento del brote.

En homoinjertos; al igual que en el PI, la combinación con el mayor Cb fue AS76 X AS76 con 20.6 cm de la variedad pseudostrobus, seguido de la combinación AS3 X AS3 con 17.8 cm; en las demás combinaciones el Cb se mantuvo entre 12 y 16.6 cm; por otra parte, la tasa de Cb fue mayor para los injertos de la variedad pseudostrobus respecto a la var. oaxacana, con diferencias de hasta 8.6 cm (Cuadro 13).

En los injertos realizados intraespecíficamente, el Cb promedio de las interacciones (12 cruzas/variedad) para la variedad oaxacana fue de 14.3 cm y en la variedad pseudostrobus de 18.5 cm; nuevamente las combinaciones AS3 X AS45 y AS6 X AS76 (portainjerto X yema, respectivamente) de la variedad oaxacana y la variedad pseudostrobus presentaron el mayor Cb con 25.2 y 21.2 cm respectivamente; en las demás interacciones el Cb se mantuvo de 12 a 18.2 cm (Cuadro 13).

Cuando se realizaron injertos intervarietales, el Cb promedio fue de 18.84 cm, sin embargo, en la combinación AS45 X AS6 (portainjerto de la var. oaxacana/yema de la var. pseudostrobus) presentó crecimiento superior al promedio con 24.1 cm, con diferencias de hasta 12.8 cm respecto a otras combinaciones (P.ej. AS15 X AS3 con 12 cm de Cb); también la combinación AS3 X AS62 (portainjerto de la var. oaxacana/yema de la var. pseudostrobus) presentó buen crecimiento (23.4 cm) respecto al promedio obtenido para este nivel de afinidad.

Cuando se utilizó el AS6 y AS62 de la variedad pseudostrobus como porta injertos en otras combinaciones, también se obtuvo buen crecimiento (20 a 23 cm); en los demás injertos intervarietales, el Cb presentó un rango de 12 a 20 cm (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Comparación de media de Tukey ( $p \leq 0.05$ ) para el crecimiento del brote (Cb) entre los niveles de interacción y afinidad en injertos recíprocos de *P. pseudostrubus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrubus* var. *pseudostrubus*.

1. Homoinjertos (n= 48)		2. Injertos intraespecíficos (n= 120)		3. Injertos intervarietales (n= 90)	
Cruza	Cb (cm)	Cruza	Cb (cm)	Cruza	Cb (cm)
*AS76 X AS76	20.6 a	*AS3 X AS45	25.2 a	*AS45 X AS6	24.8 a
AS3 X AS3	17.8 b	AS6 X AS76	21.2 a	*AS3 X AS62	23.4 a
AS62 X AS62	16.6 c	AS38 X AS3	18.2 ab	AS6 X AS3	22.8 ab
AS15 X AS15	13.5 c	AS62 X AS76	16.6 b	AS3 X AS15	22.4 ab
AS6 X AS6	12.0 d	AS45 X AS3	16.2 b	AS62 X AS45	20.6 b
AS13 X AS13	0 e	AS38 X AS13	16.0 b	AS45 X AS62	20.0 b
AS38 X AS38	0 e	AS38 X AS45	15.8 b	AS62 X AS3	19.8 b
AS45 X AS45	0 e	AS62 X AS6	15.8 b	AS45 X AS15	18.4 c
-	-	AS3 X AS13	15.6 b	AS13 X AS6	18.0 c
-	-	AS62 X AS15	15.6 b	AS15 X AS45	16.8 d
-	-	AS76 X AS6	15.4 b	AS13 X AS62	16.6 d
-	-	AS76 X AS15	15.2 b	AS6 X AS45	15.8 d
-	-	AS3 X AS38	15.2 b	AS3 X AS6	15.6 d
-	-	AS15 X AS62	13.6 bc	AS13 X AS15	15.2 d
-	-	AS76 X AS 62	13.2 bc	AS15 X AS3	12.4 e
-	-	AS13 X AS38	12.8 c	AS62 X AS13	0
-	-	AS6 X AS62	12.8 c	AS6 X AS13	0
-	-	AS13 X AS3	12.8 c	AS15 X AS13	0
-	-	AS45 X AS38	12.6 c	-	-
-	-	AS6 X AS15	12.0 c	-	-
-	-	AS15 X AS6	0	-	-
-	-	AS45 X AS13	0	-	-
-	-	AS13 X AS45	0	-	-
-	-	AS15 X AS76	0	-	-

\* Diferencia altamente significativas. Letras distintas indican diferencias dentro de cada nivel de afinidad. En las combinaciones (AS X AS), el primer árbol representa al portainjerto, la letra X la cruza, y el segundo árbol es el donador de la yema.

Con los resultados obtenidos se ha demostrado que existen materiales involucrados en el injerto (yema/portainjerto) que independientemente del nivel de afinidad o interacción pueden influir en su crecimiento y mayor éxito, siempre y cuando estos materiales sean empleados adecuadamente en algún nivel de interacción al realizar injertos con la var. *oaxacana* y la var. *pseudostrubus*. Por otra parte, el uso de

portainjertos y yemas jóvenes y las características asociadas a ellos, junto con la técnica de injertado, dan como resultado mayor éxito y crecimiento de los injertos.

Cuando se utilizaron portainjertos (caso AS3 y AS45) de la variedad oaxacana, en injertos intraespecíficos e intervarietales, los parámetros de crecimiento y éxito aumentaron; al respecto, en algunos estudios se ha confirmado que utilizar distintos portainjertos en pino aumenta el PI y crecimiento de los injertos (Świerczyński *et al.*, 2018), autores como Ahlgren y Wilderness (1972) concuerdan con los resultados obtenidos, ya que en su trabajo evaluaron el éxito y crecimiento en patrones y yemas de injertos intra e interespecíficos de pinos con 5 hojas, y concluyeron que el crecimiento del brote aumenta considerablemente cuando se selecciona adecuadamente un portainjerto, aun cuando se trata de injertos interespecíficos. Por el contrario, cuando se presenta un crecimiento bajo después del injerto, a menudo se debe a una mala unión entre la yema y el portainjerto (Hibbert-Frey *et al.*, 2011).

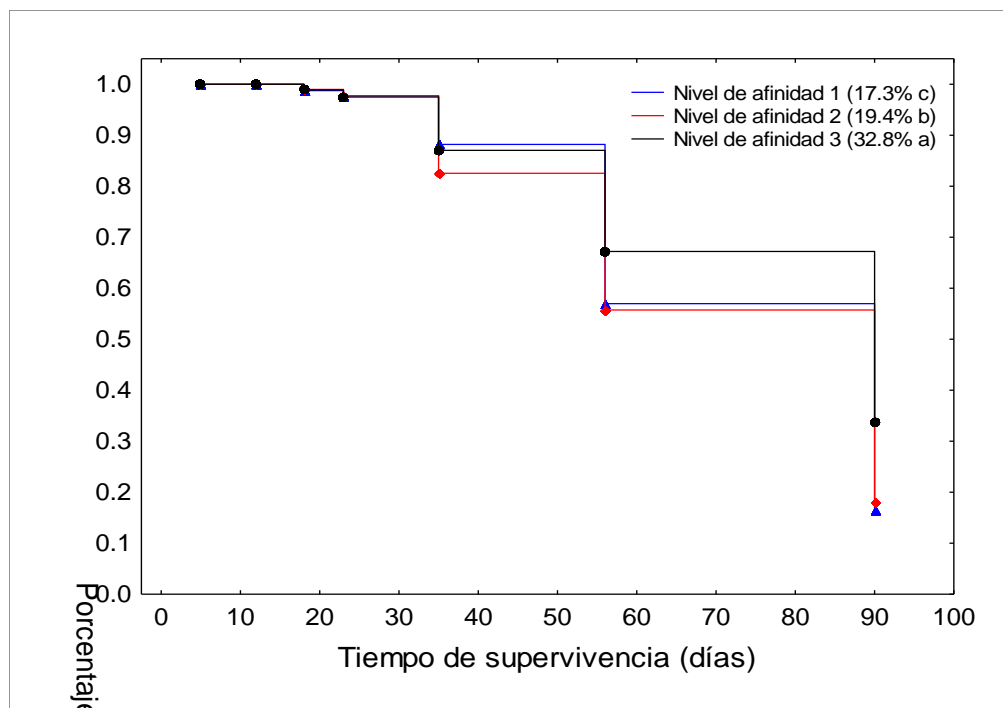
En algunos estudios se menciona que al utilizar yemas provenientes de brotes líderes como en este caso, puede aumentar el éxito, vigor y crecimiento en injertos terminales con especies de algunas coníferas, (Świerczyński *et al.*, 2018; Kita *et al.*, 2013 y 2018), además es importante considerar que el hábito de crecimiento de las procedencias de la yema determina en gran medida el crecimiento del brote del injerto (Martinez-Ballesta *et al.*, 2010; Koepke & Dhingra, 2013).

Autores como Viveros-Viveros & Vargas-Hernández (2007) y Martinez-Ballesta *et al.* (2010), en sus trabajos concluyen que, al emplear yemas jóvenes en etapas iniciales de crecimiento vegetativo, aumenta el crecimiento de los injertos, debido a que la yema continúa con su fase activa de crecimiento estableciendo fuertes conexiones entre los tejidos vasculares del portainjerto y la yema injertada.



### 4.3.3. Supervivencia de los injertos

A los 90 días de haberse realizado el injerto, independiente del nivel de afinidad e interacción, la supervivencia promedio fue de 24.3%; se observó mayor mortalidad durante los primeros 60 días (hasta 40%), el valor más alto de mortalidad se presentó en homoinjertos de ambas variedades (hasta un 80%). La prueba de supervivencia estimada por el método Kaplan-Meier mostró diferencias significativas ( $\text{Chi}^2= 6.56$  y  $p<0.01$ ), entre los tres niveles de interacción y compatibilidad (Figura 14), sin embargo, dentro de los niveles de interacción, no se presentaron diferencias significativas. El porcentaje de supervivencia de los homoinjertos (nivel de afinidad 1), injertos intraespecíficos (nivel de afinidad 2) e injertos intervarietales (nivel de afinidad 3) después de 90 días del injerto fueron de 17.3%, 19.4% y 32.8% respectivamente (Figura 14).



**Figura 14.** Supervivencia estimada con el modelo de Kaplan-Meier para injertos recíprocos realizados en distintos niveles de interacción y afinidad con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*. Valores con letras distintas indican diferencias estadísticas de acuerdo con las pruebas de  $\text{Chi}^2$  y Tukey ( $p\leq 0.05$ ).

Los resultados demostraron que el porcentaje de supervivencia estuvo determinado mayormente por las condiciones ambientales presentes en la época en que se realizó el injerto (principios de otoño de 2019), ya que el exceso de humedad relativa del ambiente contribuyó a la presencia de hongos en los injertos (aun después de aplicar fungicidas), por lo tanto, una considerable cantidad de injertos tuvo problemas por fungosis (15% en promedio) aumentando el porcentaje de mortandad; sin embargo, para el resto de los injertos muertos (promedio de 50%), fue evidente que no se formó un callo de unión resistente entre los tejidos vasculares del portainjerto/yema (causa potencial de incompatibilidad) debido a que se pudo apreciar que ambas partes estaban deshidratadas; y cuando aparentemente se presentó la unión, la yema se tornó de color amarillento, síntomas que de acuerdo con diversos autores como Hibbert-Frey *et al.* (2011), Darikova *et al.* (2011), Goldschmidt (2014), Gaspar *et al.* (2017) y Kita *et al.* (2018), representan un grado de incompatibilidad potencial temprana (Figura 15).



**Figura 15.** Injertos recíprocos vivos y con presencia de compatibilidad, realizados en tres niveles de afinidad con *P. pseudostrobus* var. *oaxacana* y *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus*. a) homoinjertos de la var. *pseudostrobus*, b) homoinjertos de la var. *oaxacana*, c) injerto intraespecífico con la var. *pseudostrobus*, d) injerto intraespecífico de la var. *oaxacana*, e) injerto intervarietal de la var. *oaxacana* x var. *pseudostrobus* (portainjerto/yema) y f) síntomas de incompatibilidad temprana.

Las variables que se midieron durante la realización de los injertos (altura de injertado, diámetro de yemas y portainjertos, y longitud de la yema) no mostraron efectos significativos en la supervivencia del injerto, prendimiento y crecimiento, por lo tanto, la supervivencia de los injertos con ambas variedades, interactuando en distintos niveles de afinidad, no se vio relacionada con estas variables.

En algunos trabajos dónde se han realizado homoinjertos con *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze, la época de injertado, la procedencia y estado fisiológico de la yema, junto con las condiciones ambientales, han demostrado ser determinantes para obtener un porcentaje de supervivencia alto (60%), además, con un buen prendimiento y crecimiento del brote (Gaspar *et al.*, 2013).

Un factor poco estudiado pero de importancia al momento de realizar injertos intra o interespecíficos, es el lugar de donde se cortó la yema junto con su procedencia, ya que las yemas provenientes de brotes líderes, superiores o apicales como las utilizadas en este trabajo, permiten obtener porcentajes elevados de supervivencia, tal y como lo señalan Holst *et al.* (1963), Gaspar *et al.* (2017) y Pérez-Luna *et al.* (2020) en sus respectivos estudios, ya que estos autores concluyeron que en especies de coníferas (incluidas especies de *Pinus*), el origen de la yema determina el porcentaje de supervivencia, sobre todo cuando se trata de injertos interespecíficos.

En este trabajo se pudo apreciar que en injertos intervarietales el porcentaje de supervivencia fue mayor respecto al obtenido en homoinjertos, la causa probable fue que se utilizaron yemas terminales, que inmediatamente retomaron su crecimiento apical; al respecto se sabe que las interacciones entre el portainjerto/yema persisten durante toda la vida del injerto, incluso cuando se dice que no existe compatibilidad satisfactoria del injerto. Además, los heteroinjertos pueden usarse para evaluar la interacción de los mecanismos internos y externos de diferenciación celular, es decir en estudios anatómicos que determinen con precisión el efecto de las interacciones en la supervivencia final del injerto, de

acuerdo con lo señalado por Darikova *et al.* (2011 y 2013) y Castro-Garibay *et al.* (2017), en sus respectivos trabajos; es importante elegir los materiales adecuados que permitan la unión exitosa de ambas estructuras del injerto, especialmente cuando se trata de la nutrición de la parte aérea del injerto.

Sin embargo, en ocasiones el suministro ascendente de nutrientes y agua, así como el flujo descendente de los fotosintatos, y también el intercambio de señales hormonales entre las raíces del portainjerto y la yema pueden explicar muchos de los efectos desfavorables conocidos en los injertos, tales como poco prendimiento, bajos crecimientos, poca o nula productividad de estróbilos y un bajo porcentaje de supervivencia (Aloni *et al.*, 2010). Al respecto, Hartmann y Kester (1994) mencionan que el éxito de los injertos depende de varios factores, entre los que destaca la compatibilidad, la vitalidad de las yemas y portainjertos, las reservas nutricionales de ambos y las condiciones ambientales durante su realización; por otra parte, se han estudiado muy poco los efectos referentes a la interacción y compatibilidad del injerto, por lo que un bajo porcentaje de supervivencia, se considera que se debe principalmente a este factor (Goldschmidt, 2014; Kita *et al.*, 2018).

Respecto a la técnica de injertado que se empleó en este trabajo (fisura terminal), se ha utilizado ampliamente en especies del género *Pinus* en todo el mundo, debido a que con esta técnica se puede obtener mayor precocidad en la producción de conos, desde el primer año después del injerto (Gaspar *et al.*, 2017). De acuerdo a los resultados obtenidos del porcentaje de supervivencia bajo, sobre todo en homoinjertos, es recomendable continuar investigando los factores involucrados en el éxito o el fracaso de la propagación mediante injerto con especies de *Pinus*, principalmente para aquellos que son considerados de mayor importancia económica o ambiental como *P. pseudostrobus*, todo esto, con el objetivo de establecer huertos semilleros asexuales o clonales que permitan abastecer y suministrar semilla de alta calidad genética, para programas de plantaciones forestales comerciales a largo plazo, por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo, pueden servir de base para futuros trabajos en esta área de investigación.

#### 4.4. CONCLUSIONES

El éxito, crecimiento y la supervivencia de los injertos, fueron determinados significativamente por la interacción y compatibilidad que se presentó en cada nivel de afinidad entre patrones y yemas, al realizar injertos intraespecíficos e intervarietales con *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* y *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*.

Es posible realizar injertos intervarietales con yemas y portainjertos de las variedades estudiadas; ya que presentaron los valores más altos de PI, Cb y porcentaje de supervivencia; estos resultados fueron algo inesperados, debido a que en homoinjertos e injertos intraespecíficos existe una relación más estrecha entre ambas partes del injerto; sin embargo, es notable que las yemas de algunos clones de *P. pseudostrobus* var. *pseudostrobus* injertados en portainjertos de *P. pseudostrobus* var. *oaxacana*, mostraron mayor prendimiento, rápido crecimiento del nuevo brote y un porcentaje alto de supervivencia.

Aunque la supervivencia fue disminuyendo después de haber realizado el injerto, es posible aumentar su porcentaje, si se eligen adecuadamente los portainjertos y yemas, tanto en homoinjertos, injertos intraespecíficos e intervarietales, para maximizar el éxito del injerto, y minimizar el grado de incompatibilidad potencial de ambas variedades.

Con la técnica de injerto fisura terminal se obtuvieron buenos resultados, sin embargo, es conveniente investigar otros factores involucrados en el éxito o el fracaso de la propagación mediante injerto para *P. pseudostrobus*, igual que para otras especies de pino, principalmente para aquellos que son considerados de importancia económica o ambiental.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aloni, B., Cohen, R., Karni, L., Aktas, H., and Edelstein, M. (2010). Hormonal signaling in rootstock-scion interactions. *Sci. Hortic.* 127, 119–126. DOI: 10.1016/j.scienta.2010.09.003
- Ahlgren, C. E., & Wilderness, Q. S. (1972). Some effects of inter and intraspecific grafting on growth and flowering of some five-needle pines. *Silvae Genet.* 21(3/4):122-126.
- Barbosa, G. G., Sánchez, A. V. y Velazco, F. V. (1984). Pruebas de injertado en *Pinus pseudostrobus* var. *oaxacana* Mtz., en los Altos de Chiapas. Boletín Técnico no. 99. SARH. SFF. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, D.F. 35 p.
- Barnes, H. W. (2008). Grafting of *Cedrus atlantica* onto *Pinus strobus*. In. Combined Proceedings International Plant Propagator's Society. 58, 334-335 p.
- Castro-Garibay, S. L., Villegas-Monter, A., & López-Upton, J. (2017). Anatomy of rootstocks and scions in four pine species. *Forest. Res.* 6: 1–6. DOI: 10.4172 / 2168-9776.1000211
- Copes, D. L. (1980). Development of internal graft incompatibility symptoms in *Pinus radiata* D. DON. New Zealand, *Journal of Forestry Science*, 10: 367-380
- Copes, D. L. (1999). Breeding Graft-compatible Douglas-fir Rootstocks (*Pseudotsuga menziesii* (MIRB.) FRANCO). *Silvae Genetica*, 48: 3-4

- Darikova, J. A., Savva, Y. V., Vaganov, E. A., Grachev, A. M., & Kuznetsova, G. V. (2011). Grafts of woody plants and the problem of incompatibility between scion and rootstock (a review). *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология*, 4(1): 54-63.
- Darikova, Y. A., Vaganov, E. A., Kuznetsova, G. V., & Grachev, A. M. (2013). Changes in the anatomical structure of tree rings of the rootstock and scion in the heterografts of Siberian pine. *Trees*, 27(6): 1621-1631.
- Flaishman, M. A., Loginovski, K., Golobowich, S., and Lev-Yadun, S. (2008). *Arabidopsis thaliana* as a model system for graft union development in homografts and heterografts. *J. Plant Growth Regul.* 27: 231–239. DOI: 10.1007/s00344-008-9050-y
- Gaspar, R. G. B., Wendling, I., Stuepp, C. A., & Angelo, A. C. (2017). Rootstock age and growth habit influence top grafting in *Araucaria angustifolia*. *Cerne*, 23(4): 465-471. DOI: 10.1590/01047760201723042447
- Goldschmidt, E. (2014). Plant grafting: new mechanisms, evolutionary implications. *Frontiers in plant science*, 5: 1-9. DOI: 10.3389/fpls.2014.00727
- González, J. B. (2017). Clonación de árboles maduros de *Pinus leiophylla* schiede ex schldl. Et cham. de un huerto semillero sexual. Tesis de maestría, Colegio de Posgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 80 p.
- Hartmann, H. T., & Kester, D. E. (1994). Propagación de plantas y principios Básicos. CECSA, Ed. Continental, séptima reimpresión. México, DF. 760 p.
- Hibbert-Frey, H., Frampton, J., Blazich, F. A., Hundley, D., & Hinesley, L. E. (2011). Grafting Fraser Fir (*Abies fraseri*): effect of scion origin (crown position and branch order). *HortScience*, 46(1): 91-94. DOI: 10.21273/HORTSCI.46.1.91

- Holst, M. J., Stanton, J. A., and Yeatman, C. W. (1963). Greenhouse grafting of spruce and hard pine at the Petawawa Forest Experiment Station, Chalk River, Ontario. In: Hatcher RJ, ed. Species Index for Technical Notes. Ottawa: Government of Canada, *Department of Forestry*. 57-63 p.
- Kita, K. (2013). Selection of secondary generation of Dahurian larch. Quarterly Report “*Koshuna*”, 167: 4-8.
- Kita, K., Kon, H., Ishizuka, W., Agathokleous, E., & Kuromaru, M. (2018). Survival rate and shoot growth of grafted Dahurian larch (*Larix gmelinii* var. japonica): a comparison between Japanese larch (*L. kaempferi*) and F1 hybrid larch (*L. gmelinii* var. japonica × *L. kaempferi*) rootstocks. *Silvae Genetica*, 67(1): 111-116. DOI: 10.2478/sg-2018-0016
- Koepke, T., and Dhingra, A. (2013). Rootstock scion somatogenetic interactions in perennial composite plants. *Plant Cell Rep* 32, 1321–1327. DOI: 10.1007/s00299-013-1471-9
- Kolegova, N. F. (1977). Geographicheskie privivochnye plantacii sosny ikedrav Krasnoyarskoi lesostepi. V: Geographicheskie kultury i plantacii hvojnich v Sibiri (Graft provenance plantations of Scots and Siberia pine in Krasnoyarsk forest-steppe. *In: Provenance and other forest plantations of coniferous in Siberia*). Novosibirsk: Nauka, SB. AS. USSR, 154-166.
- Kaplan, E. L., & Meier, P. (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American statistical association*, 53(282): 457-481.
- Lott, L. H., Lott, L. M., Stine, M., Kubisiak, T. L., & Nelson, C. D. (2003). Top grafting longleaf x slash pine F1 hybrids on mature longleaf and slash pine interstocks. 96-101 p.



- Martinez-Ballesta, M. C., Alcaraz-Lopez, C., Muries, B., Mota-Cadenas, C., and Carvajal, M. (2010). Physiological aspects of rootstock scion interactions. *Sci. Hortic*, 127, 112–118. DOI: 10.1016/j.scienta.2010.08.002
- Mosse, B. (1962). *Graft Incompatibility in Fruit Trees: With Particular Reference to its Underlying Causes*. Technical Communication No. 28. Kent: Commonwealth Agricultural Bureaux, 36.
- Mudge, K., Janick, J., Scofield, S., and Goldschmidt, E. E. (2009). A history of grafting. *Hortic. Rev.* 35: 437–493. DOI: 10.1002 / 9780470593776.ch9
- Muñoz, F. H. J., Orozco, G. G., Coria, A. V. M., Toledo, B. R., & Aguilar, G. H. (2011). Validación de dos métodos de injerto de *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Michoacán. Folleto técnico Núm. 24. INIFAP. C.E. Uruapan, Michoacán, México. 43 p.
- Muñoz F. H.J., Ángel J.P.R., Flores A.G., Pineda T.O., y Morales G. E. (2013). Técnicas de injertado enchapado lateral y fisura terminal en *Pinus pseudostrobus* Lindl. Folleto técnico Núm. 68, CE. Valle del Guadiana, Centro de Investigación Regional Norte Centro. Durango, Dgo.48 p.
- Pérez-Luna, A., Prieto-Ruíz, J. Á., López-Upton, J., Carrillo-Parra, A., Wehenkel, C., Chávez-Simental, J. A., & Hernández-Díaz, J. C. (2019). Some factors involved in the success of side veneer grafting of *Pinus engelmannii* Carr. *Forests*, 10(2): 112. DOI: 10.3390/f10020112
- Pérez-Luna, A., Wehenkel, C., Prieto-Ruíz, J. Á., López-Upton, J., & Hernández-Díaz, J. C. (2020). Survival of side grafts with scions from pure species *Pinus engelmannii* Carr. and the *P. engelmannii* x *P. arizonica* Engelm. var. *arizonica* hybrid. *PeerJ*, 8, e8468. DOI: 10.7717/peerj.8468

- Statistica. (2018). Programa de análisis y visualización de datos. Disponible en: <https://statistica.software.informer.com/13.0/> (marzo de 2020).
- Świerczyński, S., Kolasiński, M., Urbaniak, M., Stachowiak, A., & Nowaczyk, N. (2018). Influence of rootstock and grafting date on the success and grafts growth of two cultivars of pines. *Horticulture*, 21(4), 06. DOI: 0.30825/5.EJPAU.165.2018.21.4.
- Viveros-Viveros, H., Sáenz-Romero, C., Vargas-Hernández, J. & López-Upton, J. (2006). Variación entre procedencias de *Pinus pseudostrobus* establecidas en dos sitios en Michoacán, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2): 121-126.
- Viveros-Viveros, H., & Vargas-Hernández, J. J. (2007). Dormancia en yemas de especies forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 13 (2): 31-135.
- Wang, J. W., Park, M. Y., Wang, L. J., Koo, Y., Chen, X. Y., Weigel, D... *et al.* (2011). MiRNA control of vegetative phase change in trees. *PLoS Genet.* 7: e1002012. DOI: 10.1371/journal.pgen.1002012
- Wutscher, H. K. (1979). Citrus rootstocks. *Hortic. Rev.* 1, 237–269.
- Wu, R., Wang, X., Lin, Y., Ma, Y., Liu, G., Yu, X.... *et al.* (2013). Inter-species grafting caused extensive and heritable alterations of DNA methylation in Solanaceae plants. *PLoS ONE*, 8:e61995. DOI: 10.1371/journal.pone.0061995
- Zarrouk O., Testillano P.S., Risueño M.C... *et al.* (2010). Changes in cell/tissue organization and peroxidase activity as markers for early detection of graft incompatibility in peach/plum combinations. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 135: 9-17.
- Zobel, B. J., & Talbert, J. T. (1988). *Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales*. México DF. Ed. Limusa. 545 p.