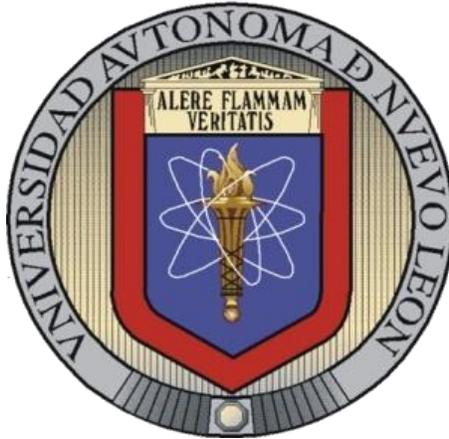


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EFFECTO DEL MANEJO Y CALIDAD DE PLANTA EN
VIVERO, EN LA SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE
Pinus pseudostrobus Lindl. EN SITIOS DE BAJA
PRODUCTIVIDAD**

Por

JOSÉ ÁNGEL SIGALA RODRÍGUEZ

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES**

Linares, Nuevo León, México

Junio de 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**EFFECTO DEL MANEJO Y CALIDAD DE PLANTA EN VIVERO, EN
LA SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE *Pinus pseudostrobus*
Lindl. EN SITIOS DE BAJA PRODUCTIVIDAD**

T E S I S

Para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

Presentada por:

JOSÉ ÁNGEL SIGALA RODRÍGUEZ

COMITÉ DE TESIS



Dr. Marco Aurelio González Tagle
DIRECTOR



Dr. Javier Jiménez Pérez
ASESOR



Dr. Humberto González Rodríguez
ASESOR



Dr. José Ángel Prieto Ruíz
ASESOR EXTERNO

Linares, Nuevo León

Junio de 2013

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por el apoyo otorgado para realizar los estudios de Maestría en Ciencias Forestales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por la oportunidad para realizar mis estudios, así como a todos los profesores que compartieron sus conocimientos.

Al Dr. Marco A. González Tagle por su amistad, disposición y apoyo incondicional para dirigir este proyecto.

Al Dr. José Ángel Prieto Ruíz por su preocupación e interés en mi superación profesional, además por ilustrarme con su experiencia y conocimiento para el desarrollo de mi tesis.

Al Dr. Humberto González Rodríguez y al Dr. Javier Jiménez Pérez por sus acertadas observaciones para mejorar la calidad de este trabajo.

Al Profr. Dr. Christoph Kleinn por su hospitalidad durante mi estancia en la Universidad de Göttingen, Alemania, y por su asesoría en el análisis estadístico de los datos.

Al Dr. Homero Salinas González por todas las facilidades brindadas para la autorización oficial del programa de maestría ante el INIFAP.

A Don Raúl Carreón por su apoyo en el manejo de la planta en el Vivero Forestal del Bosque Escuela.

A Don Ascensión Villa del ejido Galeana N.L., por facilitar su terreno para establecer la plantación experimental.

A la Ing. Inés Yáñez Díaz por su apoyo en el análisis de las muestras de suelo.

A mis amigos y compañeros de la maestría, con la disculpa de alguna omisión: Lulú Borrego, Román Ramírez, Carlos Mora, Alejandro Roblero, Hailen Ugalde, Alejandro Martínez, Jaime Talavera, Heriberto García, Lizzet Lima y Alma López, por su valioso apoyo en las mediciones durante fase de vivero y en las evaluaciones en campo.

DEDICATORIA

A mis padres Bernabé y Angelita, gracias a ustedes he sabido lo que significa el amor a la familia, el respeto a la tierra, la pasión por el trabajo y la fe en Dios.

A todos aquellos que han dedicado su vida profesional al impulso de la investigación y desarrollo de tecnologías en materia de viveros y plantaciones forestales en México.

CONTENIDO

Índice de Figuras	vi
Índice de Cuadros	viii
Resumen General	x
1 Introducción General	1
1.1 Factores que influyen en el desempeño de las reforestaciones.....	2
1.1.1 Condiciones del sitio de plantación.....	2
1.1.2 Manejo de la planta	4
1.1.3 Calidad de planta.....	5
1.2 Descripción de la especie	7
1.3 Objetivo general y enfoque de la investigación	7
1.4 Referencias	8
2 Materiales y Métodos	13
2.1 Material vegetal	13
2.2 Preacondicionamiento de la planta	14
2.3 Evaluación de calidad de planta.....	14
2.4 Establecimiento de la plantación.....	14
2.5 Evaluación de supervivencia y crecimiento en campo	16
2.6 Referencias	17
3 Calidad de planta y predicción de biomasa en plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. cultivado bajo diferentes sistemas de producción en vivero	19
3.1 Resumen.....	19
3.2 Summary.....	20
3.3 Introducción.....	21
3.4 Objetivos e hipótesis	23
3.4.1 Objetivos.....	23
3.4.2 Hipótesis nula	23
3.5 Metodología	24
3.5.1 Análisis de calidad de planta	24
3.5.2 Desarrollo de ecuaciones	25
3.5.3 Validación de ecuaciones	26
3.6 Resultados y discusión.....	27
3.6.1 Calidad de planta.....	27
3.6.2 Predicción de biomasa	29

3.7	Conclusiones.....	36
3.8	Referencias	37
4	Supervivencia y crecimiento inicial de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. en dos condiciones de sitio.	41
4.1	Resumen.....	41
4.2	Summary.....	42
4.3	Introducción.....	43
4.4	Objetivos e hipótesis	44
4.4.1	Objetivos.....	44
4.4.2	Hipótesis nula	44
4.5	Metodología	45
4.5.1	Variables analizadas.....	45
4.5.2	Análisis estadístico	46
4.6	Resultados y discusión.....	48
4.6.1	Supervivencia	48
4.6.2	Desarrollo inicial	53
4.7	Conclusiones.....	58
4.8	Referencias	59
5	Predicción de la supervivencia y crecimiento de <i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl. en función de las variables morfológicas iniciales	63
5.1	Resumen.....	63
5.2	Summary.....	64
5.3	Introducción.....	65
5.4	Objetivos e hipótesis	66
5.4.1	Objetivos.....	66
5.4.2	Hipótesis nula	66
5.5	Metodología	67
5.5.1	Variables analizadas.....	67
5.5.2	Análisis estadístico	67
5.6	Resultados y discusión.....	68
5.6.1	Supervivencia en campo	68
5.6.2	Crecimiento inicial.....	73
5.7	Conclusiones.....	76
5.8	Referencias	77
6	Consideraciones finales	81
	Acerca del autor	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ubicación geográfica del área de estudio	15
Figura 2.2. Temperatura al ambiente promedio y precipitación acumulada mensual en Galeana, N. L. durante el año 2012. Fuente: elaboración propia con datos de la CONAGUA.	15
Figura 3.1. Dispersión de datos de peso seco total (lnPST) contra las variables independientes (lnD y lnD ² H) y líneas de tendencia en la forma $\ln W = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X$ para cada sistema de producción.	30
Figura 3.2. Peso seco total en función de D (A) ó D ² H (B): modelo completo para los diferentes sistemas de producción, así como el modelo reducido sin considerar el sistema de producción.....	33
Figura 3.3. Peso seco total predicho contra peso seco observado en los datos de validación (n=108). Modelo completo para D (A), D ² H (C) y D, H (E) y modelo reducido para D (B), D ² H (D) y D, H (F).....	36
Figura 4.1. Función de supervivencia estimada [S(t)] para los diferentes tratamientos evaluados en la reforestación con <i>P. pseudostrobus</i> , en dos sitios de plantación.	51
Figura 4.2. Incremento y tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura de <i>Pinus pseudostrobus</i> en 14 meses de establecimiento en campo.	55
Figura 4.3. Biomasa acumulada en cada tratamiento para las dos condiciones de sitio a 14 meses después de plantado.	57
Figura 4.4. Incremento y tasa relativa de producción en biomasa (aérea y raíz) de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 14 meses después de plantado.....	58
Figura 5.1. Razones de probabilidad y sus intervalos de confianza de los factores principales que afectan la supervivencia de <i>Pinus pseudostrobus</i> . La línea punteada indica razón de probabilidad de 1.0, por lo que las comparaciones cuyo intervalo de	

confianza intercepta dicha línea, simbolizan un estimador no significativo ($p < 0.05$) en el modelo de regresión..... 70

Figura 5.2. Probabilidad de supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en cada sitio de plantación en función del diámetro inicial. Cada punto representa la supervivencia observada por repetición para cada sistema de producción. 72

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Sistemas de producción evaluados en plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> en el Vivero del Bosque Escuela (FCF-UANL).	13
Cuadro 2.2. Características de los sitios en donde se estableció la plantación	16
Cuadro 3.1. Estadísticos descriptivos de los conjuntos de datos de calibración y validación para las variables usadas en el desarrollo de las ecuaciones.....	24
Cuadro 3.2. Media y error estándar de las características iniciales de las plantas de <i>Pinus pseudostrobus</i> previo al establecimiento de la plantación.....	27
Cuadro 3.3. Parámetros del modelo reducido ajustado a la forma lineal después de la transformación logarítmica ($\ln W = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X$).	30
Cuadro 3.4. Estimadores de los parámetros en los modelos completos ANCOVA ($\ln W_{ij} = \mu + \alpha_i + (\beta_j + \gamma_i) \ln X_{ij}$) para el peso seco de cada componente en función de diámetro, altura y el sistema de producción.	32
Cuadro 3.5. Resultados (valores de F y P) de la comparación de el modelo completo (por cada sistema de producción) con el modelo reducido para cada componte de biomasa.	34
Cuadro 3.6. Media y desviación estándar de error relativo de predicción (RPE) para el conjunto de datos de validación.	35
Cuadro 4.1. Valores de los parámetros para calcular biomasa en plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> por cada sistema de producción.	45
Cuadro 4.2. Supervivencia estimada por tratamiento en cada sitio de plantación, de acuerdo al método Kaplan-Meier.....	49
Cuadro 4.3. Resultados de la regresión de riesgos proporcionales para la supervivencia de <i>P. pseudostrobus</i>	53

Cuadro 4.4. Valores de F y $Pr>F$ del ANCOVA para variables de crecimiento de plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 14 meses de establecimiento en campo (Test de tipo III).	53
Cuadro 4.5. Valores de F y $Pr>F$ del ANCOVA para variables de producción de biomasa en plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 14 meses de establecimiento en campo (Test de tipo III).	56
Cuadro 5.1. Estadísticas del modelo de regresión logística para la estimación de la probabilidad de supervivencia considerando los factores fijos independientes y las variables morfológicas iniciales.....	69
Cuadro 5.2. Estadísticas del modelo de regresión logística para la estimación de la probabilidad de supervivencia en función de variables morfológicas iniciales de la planta.....	71
Cuadro 5.3. Coeficientes de correlación de Pearson para la relación entre las variables morfológicas iniciales y las variables de crecimiento de <i>Pinus pseudostrobus</i> a 14 meses de establecimiento en campo.....	73
Cuadro 5.4. Estimadores de los parámetros de la regresión y sus estadísticos relacionados para los modelos seleccionados para la predicción del crecimiento en campo en función de las características morfológicas iniciales de plántulas de <i>Pinus pseudostrobus</i>	75

RESUMEN GENERAL

El objetivo general de la presente tesis fue investigar el efecto del cultivo y manejo de la planta de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en vivero, en su calidad morfológica, así como en su posterior desempeño en campo. Se utilizaron plantas cultivadas bajo tres sistemas de producción en el Vivero Forestal del Bosque Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales (UANL): 1) un año de edad, cultivadas en charola de poliestireno (1+0), 2) dos años cultivadas en bolsa de polietileno (2+0) y, 3) dos años cultivadas en charola de poliestireno y trasplantadas a bolsa de polietileno (1+1). Previo a la plantación, las plántulas se sometieron a tres niveles de preacondicionamiento durante 45 días, mediante la modificación del régimen de riegos para inducir estrés hídrico: 1) nivel bajo, un riego diario; 2) nivel moderado, un riego a saturación cada 9 días y, 3) nivel alto, un riego a saturación cada 15 días. La plantación se estableció en el municipio de Galeana, Nuevo León en dos sitios de condiciones contrastantes: 1) pendiente moderada con exposición NE y, 2) pendiente fuerte con exposición SO. Se monitoreó la supervivencia y crecimiento durante los primeros 14 meses después de plantado. Los resultados obtenidos se resumen a continuación.

1) Calidad de planta y predicción de biomasa en plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. cultivado bajo diferentes sistemas de producción en vivero. Para las variables morfológicas de la planta, se obtuvieron diferencias significativas entre los sistemas de producción pero no así en los niveles de preacondicionamiento. También se encontró una influencia del factor sistema de producción sobre el intercepto y pendiente de la relación entre biomasa y las variables diámetro (D), altura (H) y D^2H ; los modelos completos por componente de biomasa (aérea, de raíz y total) presentaron mejor ajuste y precisión que los modelos reducidos generales sin considerar el sistema de producción. Para los tres componentes de biomasa, el diámetro fue la variable que explicó, en mayor proporción, la variación en la biomasa, aunque se observó mejor ajuste en los modelos que se incluyó D^2H como variable independiente.

2) Supervivencia y crecimiento inicial de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en dos condiciones de sitio. Se halló un efecto significativo la condición del sitio de plantación en la supervivencia de las plántulas, además se detectaron diferencias significativas entre los sistemas de producción pero no entre los niveles de preacondicionamiento, aunque hubo una respuesta diferente en cada sistema de producción al preacondicionamiento. El crecimiento en diámetro y altura estuvo influenciado principalmente por la condición del sitio de plantación, aunque se encontraron diferencias entre los sistemas de producción, así como entre niveles de preacondicionamiento. Los factores analizados no mostraron influencia significativa en la producción de biomasa, sin embargo se observó un efecto marginal del sistema de producción.

3) Predicción de supervivencia y crecimiento de *Pinus pseudostrobus* Lindl. en función de las variables morfológicas iniciales. El diámetro al cuello de la raíz mostró una influencia altamente significativa en la probabilidad de supervivencia de *P. pseudostrobus* en campo, y los estadísticos de ajuste de los modelos para ambas condiciones de plantación, indican que dicha variable tiene una buena capacidad predictiva de la supervivencia a 14 meses de establecimiento. El diámetro y la altura inicial presentaron fuerte correlación con el diámetro y altura al final del periodo de evaluación, respectivamente. Las regresiones múltiples muestran que el diámetro al cuello, peso seco de la raíz y altura del tallo, explican en mayor proporción la variación de altura y diámetro en campo, mientras que el peso seco aéreo predice las variables de producción de biomasa, aunque con coeficientes de determinación bajos.

Palabras clave: *Pinus pseudostrobus*, supervivencia, crecimiento, viveros forestales, calidad de planta.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN GENERAL

El deterioro de los ecosistemas en diferentes regiones de mundo, es objeto de interés por parte de grupos ambientalistas de todos los sectores sociales, quienes se han preocupado por planear e impulsar un conjunto de estrategias y acciones para mejorar las condiciones de los ecosistemas degradados (Berger, 1990). Este conjunto de acciones está englobado dentro de lo que se conoce como restauración ambiental, cuya definición teórica es mover un ecosistema perturbado a una condición ecológica similar a la que se encontraba previo a su disturbio, o bien que esté dentro de los límites aceptables de funcionamiento con respecto a un ecosistema sin degradación anterior (Bradshaw, 2002; Palmer *et al.*, 2006).

En México, las políticas de restauración ambiental se han enfocado particularmente al desarrollo de programas de reforestación o de recuperación de suelos (Cervantes *et al.*, 2008); por lo tanto, su objetivo está enfocado a mitigar o compensar las disfunciones ambientales e incrementar su productividad, sin que esto implique que ecosistema degradado vuelva a su estado original (Caravias *et al.*, 2007). Esto es claro debido a que, en la práctica, es imposible restaurar completamente un ecosistema a su estado original (Choi, 2007); por ello, las plantaciones forestales cada vez cobran mayor importancia, ya que rehabilitan y/o sustituyen los bienes y servicios que proveen las masas forestales naturales (Rodríguez, 2008).

La reforestación en México se ha incrementado en las últimas dos décadas, y para abastecer la demanda de planta destinada a dichos fines, se han establecido un considerable número de viveros forestales (Rodríguez, 2008). De esta manera, los incentivos que motivan la producción de planta en vivero son tanto de tipo económico como social; por una parte, los incentivos económicos surgen de las relaciones entre la oferta y la demanda de recursos maderables y no maderables, mientras que los

incentivos sociales surgen de acciones gubernamentales con fines ambientalistas a nivel federal, estatal o municipal (Pimentel, 2009). Desafortunadamente, los programas de reforestación no han tenido el impacto esperado, ya que a nivel nacional se tienen tasas de supervivencia menores al 60% en el primer año después de plantado, siendo la sequía, la fecha inadecuada de plantación y la baja calidad de las plántulas, las causas principales de mortalidad (CONAFOR, 2009; CONAFOR, 2011).

En el estado de Nuevo León, existen siete viveros forestales en los que se producen cerca de tres millones de plantas que son destinadas a la reforestación de áreas incendiadas o degradadas. Las principales especies cultivadas son: *Pinus cembroides*, *P. pseudostrobus*, *Prosopis laevigata*, *Leucaena leucocephala*, *P. nelsoni* y *P. arizonica* (INEGI, 2012); no obstante, en las evaluaciones externas de los programas de reforestación para los años 2008, 2009 y 2010, la supervivencia estimada fue del 60.6%, en promedio (CONAFOR, 2009, CONAFOR, 2011). Por esta razón se requiere conocer las prácticas de cultivo en vivero que incrementan la calidad de planta, así como investigar las condiciones del sitio que limitan el establecimiento de las reforestaciones, a fin de definir las características ideales que debe cumplir la planta para que tenga un adecuado desempeño en el sitio definitivo de plantación.

1.1 Factores que influyen en el desempeño de las reforestaciones

De acuerdo con South (2000), la supervivencia inicial de una reforestación es afectada por múltiples factores, incluyendo, en orden de importancia: el ambiente o condiciones del sitio de plantación, el manejo o cuidados de la planta, la calidad morfológica de la planta y la condición fisiológica de la misma.

1.1.1 Condiciones del sitio de plantación

1.1.1.1 Clima

La precipitación y la temperatura son los factores que tienen mayor influencia en la distribución y el crecimiento de los bosques, por ello deben ser usados como índices para estimar la productividad en plantaciones forestales (Montero, 1999). Las

condiciones meteorológicas ideales para el adecuado establecimiento de una plantación son, en primer lugar, la existencia de precipitaciones que aseguren un arraigo inicial de la planta, una época invernal poco extremosa que dé lugar a un periodo vegetativo suficientemente largo previo a la época de sequías y, finalmente una época de sequías lo suficientemente corta para que la planta no sufra estrés antes de la llegada del próximo periodo de lluvias (Navarro *et al.*, 2006).

1.1.1.2 Suelo

El suelo es de los factores inherentes al sitio que limitan el establecimiento de una reforestación, ya que un sitio con algún disturbio es potencialmente susceptible a la pérdida del suelo por erosión, así como a la disminución de elementos nutritivos aprovechables y modificación de las propiedades físicas (Schlatter, 1977). Entre las características edáficas más importantes a tomar en cuenta antes de realizar una reforestación, se encuentran (Bonfils, 1978):

- Profundidad del suelo,
- Disponibilidad de humedad aprovechable,
- Contenido de nutrimentos,
- pH,
- Textura, y
- Condición de la superficie (horizonte A).

1.1.1.3 Topografía

La topografía influye en la formación del suelo y calidad del sitio de plantación, por lo que se debe considerar como fuente importante de variación. La pendiente y la exposición son características topográficas que se correlacionan con el crecimiento de los árboles, ya que, en cierta medida, determinan el contenido de humedad del suelo (Hairston & Grigal, 1991).

En el hemisferio norte, generalmente las exposiciones norte y noroeste con pendientes bajas se consideran óptimas para el desarrollo de los bosques, pero esta situación puede variar con la elevación y la calidad de estación (Verbyla & Fisher,

1989). También el microambiente en donde se encuentre la planta, puede tener un efecto significativo en su supervivencia (Ramírez y Rodríguez, 2004).

1.1.2 Manejo de la planta

1.1.2.1 Vivero

En un proyecto de reforestación, la fase de producción de planta en el vivero es determinante; un apropiado manejo permite producir planta con los atributos morfológicos y fisiológicos que garanticen su establecimiento en campo (Jacobs *et al.*, 2004; Prieto, 2004). El sistema de producción utilizado para el cultivo de planta forestal se define principalmente por el tipo de contenedor; en México, generalmente se han manejado dos sistemas de producción: el sistema tradicional, donde se utilizan bolsas de polietileno y el sistema tecnificado, donde se emplean charolas de poliestireno o tubos de plástico rígido (Pimentel, 2009).

Una planta producida en charola o envase rígido tiene un crecimiento rápido y es posible manejar apropiadamente los patrones de calidad en sus diferentes etapas de desarrollo (Toral, 1997); aunque, en años recientes se ha generalizado una preferencia por contenedores de mayor volumen, debido a que las plántulas adquieren características morfológicas, como volumen y longitud de la raíz, que se relacionan con un mejor desempeño en campo (Landis *et al.*, 2010).

Otros factores importantes dentro del vivero que influyen en la calidad de la planta son (Prieto *et al.*, 2009; Pimentel, 2009):

- Germoplasma,
- Tratamientos pre-germinativos,
- Sustratos de crecimiento,
- Fertilización,
- Riegos,
- Micorrizas,
- Pre-acondicionamiento.

1.1.2.2 Plantación

Una de las principales consideraciones al establecer una reforestación, es la elección de la fecha adecuada de plantación, ya que de esta dependerá la temperatura y humedad disponible en el suelo al momento de plantar (Taylor, 2007). También el método de preparación del terreno influye en la supervivencia de las plantaciones, debido a que propicia mejor infiltración de agua en el sistema radicular (Querejeta *et al.*, 2001), por ejemplo, Castillo *et al.* (2001) recomiendan subsolar y adicionar materia orgánica para mejorar las propiedades físicas del suelo y la disponibilidad de agua; sin embargo, Navarro y Palacios (2004) mencionan que la preparación del terreno por sí misma es incapaz de corregir los errores derivados de una fecha de plantación tardía, ya que no remedia la reducción del periodo vegetativo antes del invierno o del periodo de sequía. Asimismo, el control de competencias es una práctica que puede ayudar a mejorar la disponibilidad de agua y nutrientes para la especie primaria o de interés una vez que se haya establecido (Vance *et al.*, 2010).

1.1.3 Calidad de planta

Una planta de calidad es la que posee características morfológicas y fisiológicas que le permitirán establecerse y desarrollarse vigorosamente en el sitio de plantación (Rodríguez, 2008). Por ello, es indispensable definir los estándares de calidad que la planta debe cumplir antes de su salida del vivero, debido a que posiblemente la planta no se adapte a las condiciones del sitio y por lo tanto será necesario plantar dos o tres veces en la misma área, lo que implica costos económicos adicionales y una prolongación del tiempo de establecimiento de la reforestación (Duryea, 1985). En este sentido, el control de la calidad debe visualizarse de dos formas; la primera está relacionada con evaluar los estándares morfológicos y fisiológicos alcanzados en el vivero, y la segunda, consiste en comprobar estadísticamente la respuesta de tales estándares en campo (Fierros *et al.*, 2001).

1.1.3.1 Morfología

Las características morfológicas de la planta con mayor influencia en el establecimiento de una reforestación son: el diámetro, la altura y la biomasa. El diámetro está asociado con el vigor y la resistencia mecánica a daños causados por animales, insectos y temperaturas extremas, debido a que el diámetro define la robustez del brinjal (Birchler *et al.*, 1998; Gardiner *et al.*, 2009). En muchas especies existe correlación entre la altura y el crecimiento en campo (Toral, 1997); no obstante, Rodríguez (2008) menciona que un individuo demasiado alto está desequilibrado y es susceptible a daños por vientos; pero, una planta demasiado chica está expuesta a daños por pisoteo y fuego. Por otra parte, la biomasa en una plántula se relaciona con diversos procesos fisiológicos como la eficiencia fotosintética (Thompson, 1985); generalmente, es difícil medir la biomasa directamente en un lote de plantas, por lo que se requiere realizar un muestreo destructivo para obtener una media representativa del lote.

Además, existen índices de calidad compuestos por dos o más variables morfológicas que describen atributos como la robustez o la distribución de biomasa; por ejemplo, el índice de calidad de Dickson explica la relación entre la biomasa seca, el diámetro y la altura, y define que a mayor valor, la calidad será mejor (Dickson *et al.*, 1960). Otras variables cualitativas también son importantes como: la presencia de un sistema radicular fibroso, con puntos de crecimiento y con micorrizas, yema apical presente, tallo lignificado, con buen vigor y sanidad (Prieto *et al.*, 2009; Pimentel, 2009).

1.1.3.2 Fisiología

La evaluación del estado fisiológico de las plantas se realiza generalmente para determinar la resistencia a distintos tipos de estrés en campo. Se han utilizado algunas variables como el intercambio de gases (Montague *et al.*, 2000), potencial hídrico y concentración de carbohidratos (Guehl *et al.*, 1992) para medir la respuesta de las plántulas al estrés por trasplante; o bien, la distribución de biomasa y carbono para la selección de genotipos resistentes a la sequía (Cregg, 1994). También, es importante considerar la concentración de nutrientes en el follaje, principalmente los

macroelementos como nitrógeno, fósforo y potasio; para el caso de coníferas las concentraciones deben oscilar entre 1.4 y 2.2% en N, de 0.2 a 0.4% en P y de 0.4 a 1.5% en K (Landis, 1985).

1.2 Descripción de la especie

Pinus pseudostrobus Lindl. tiene una amplia distribución en México, mayormente en el Eje Neovolcánico Transversal, aunque se extiende hasta Guatemala, Honduras y El Salvador (Cambrón *et al.*, 2013). Crece en climas templados y templado-cálidos en altitudes desde los 1600 a 3250 m, con mejor calidad de estación a los 2500 m en suelos volcánicos profundos (López-Upton, 2002). Según Perry (1991), en el sur de Nuevo León se encuentra *Pinus pseudostrobus* forma *megacarpa* que se distingue por tener conos considerablemente largos (hasta 18 cm), comparado con la variedad típica.

Bajo buenas condiciones de sitio, *P. pseudostrobus* es una especie de rápido crecimiento (López-Upton, 2002), por ello, ha sido utilizada en plantaciones forestales y programas de mejoramiento genético tanto en México como en otros países (Cambrón *et al.*, 2013). En el estado de Nuevo León, *P. pseudostrobus* es una de las especies más utilizadas para los programas de reforestación, sin embargo, se ha estimado baja supervivencia (34.2%) en las plantaciones debido a afectaciones por sequías, el pastoreo y mala calidad de planta (CONAFOR, 2009).

1.3 Objetivo general y enfoque de la investigación

El objetivo general de la presente tesis fue evaluar el efecto del sistema de producción, el preacondicionamiento y la calidad morfológica de la planta, en la supervivencia y crecimiento inicial de plántulas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. establecidas en una reforestación en el sur de Nuevo León, México.

La finalidad de este estudio fue contribuir a la generación de información en relación a los parámetros de calidad de planta que mejor respuesta tienen en campo de acuerdo a las condiciones ambientales de la región, esperando resultados con validez estadística, pero a la vez que puedan tener una aplicación práctica para la

toma de decisiones en los programas de reforestación, desde la producción y selección de la planta, hasta la ejecución y manejo de la plantación.

1.4 Referencias

- Berger, J. 1990. Introduction. In: J. Berger (ed). *Environmental Restoration. Science and Strategies for Restoring the Earth*. Washington, D.C.: Ed. Island Press, pp. xv-xxiii.
- Birchler, T., R. W. Rose., A. Royo y M. Pardos. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. 7(1-2):109-121.
- Bonfils, P. 1978. Le classement des sols en vue de la reforestation en zone Méditerranéenne. *Biologie et Forêt*. 4: 271-282.
- Bradshaw, A. D. 2002. Introduction and phylosophy. In: M. R. Perrow & A. J. Davy, eds. *Handbook of ecological restoration. Volume 1: Principles of restoration*. Cambridge, UK: University Press, pp. 3-9.
- Cambrón S., V. H., N. M. Sánchez V., C. Sáenz R., J. J. Vargas H., M. L. España B. and Y. Herrerías D. 2013. Genetic parameters for seedling growth in *Pinus pseudostrabus* families under different competitive environments. *New Forest* 44(2):219-232.
- Caravias, J., V. Arriaga y V. Cervantes. 2007. Políticas públicas de la restauración ambiental en México: Limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* Num. 80: 85-100.
- Castillo, V., J. I. Querejeta y J. Albaladejo. 2001. Disponibilidad hídrica en repoblaciones de *Pinus halepensis* Mill. en medios semiáridos: efectos de los métodos de preparación del suelo. En: Junta de Andalucía-S.E.C.F (eds). *Actas del III Congreso Forestal Español-Sierra Nevada 2001*. pp.: 94-99.
- Cervantes, V., J. Carabias y V. Arriaga. 2008. Evolución de las políticas públicas de restauración ambiental. En: *Capital natural de México, vol. III: Políticas públicas y perspectivas de sustentabilidad*. CONABIO, México, pp. 155-226.
- Choi, Y. D. 2007. Restoration ecology to the future: A call for new paradigm. *Restoration Ecology* 15(2): 351–353.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2009. Reforestación. Ejercicio fiscal 2008. Facultad de Ciencias Forestales-Universidad Autónoma de Nuevo León. Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/component/phocadownload/category/45-reforestacion?download=226:informe-nacional>. Fecha de consulta: 22 de enero de 2013.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Indicadores de gestión de desempeño del programa PROCOREF durante el ejercicio fiscal 2010. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/evaluaciones/documentos-y-alcances-de-las-evaluaciones>. Fecha de consulta: 23 de enero de 2013.

- Cregg, B.M. 1994. Carbon allocation, gas exchange, and needle morphology of *Pinus ponderosa* genotypes known to differ in growth and survival under imposed drought. *Tree Physiology* 14:883-898.
- Dickson, A., A. L. Leaf and J. F. Hosner. 1960. Seedling quality - soil fertility relationships of white spruce and red and white pine in nurseries. *The Forest Chronicle*. 36(3): 237-241.
- Duryea, M. L. 1985. Evaluating seedling quality: Importance to reforestation. In: Duryea, M. L. (ed.). *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test*. Oregon State University, Corvallis. pp: 1-4.
- Fierros G., A. M., D. A. Rodríguez T., L. A. Leyva, R. Vargas C. y V. Sosa C. 2001. Ejecución de proyectos de plantaciones. En: Sosa C., V., A. M. Fierros G. (Coords.). *Curso de especialización en plantaciones forestales comerciales*. Consultora Forestal y Agropecuaria S. A. de C. V. (CONAFORA). México. pp. 71-245.
- Gardiner, E.S., F. Jacobs D., P. Overton, R. and G. Hernandez. 2009. Root-collar diameter and third-year survival of three bottomland hardwoods planted on former agricultural fields in the lower Mississippi Alluvial Valley. In: Dumroese, R.K.; Riley, L.E. (cords). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2008*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO. pp: 85–89.
- Guehl, J. M., A. Clement, P. Kaushal and G. Aussenac. 1993. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings. *Tree Physiology* 12: 173-183
- Hairston A. B. and D. F. Grigal. 1991. Topographic influences on soils and trees within single mapping units on a sandy outwash landscape. *Forest Ecology and Management*. 43:35-45.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2012. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Disponible en: www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/.../2012/forestal0.doc. Fecha de consulta: 10 de agosto de 2012.
- Jacobs, D. F., B. C. Wilson and A. S. Davis. 2004. Recent trends in hardwood seedling quality. In: Riley, L.E., Dumroese, R.K., T.D. Landis (coord). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2003*. USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station Proceedings RMRS-P-33:140-144.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. En: M. L. Duryea, editor, *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests*. Oregon State University, Forest Research Laboratory, Corvallis. pp: 29-48.
- Landis, T. D., R. K. Dumroese, and D. L. Haase. 2010. The container tree nursery manual. Volume 7. Seedling processing, storage, and outplanting. Agric. Handbook 674. Department of Agriculture. Forest Service. Washington, DC., U.S. 200 p.

- López-Upton, J. 2002. *Pinus pseudostrobus* Lindl. In: Vozzo, J. A. (ed). *Tropical Tree. Seed Manual*. United States Department of Agriculture. Forest Service. USA. pp: 636-637.
- Montague, T., R. Kjelgren and L. Rupp. 2000. Gas exchange and growth of two transplanted, field-grown tree species in an arid climate. *Hortscience* 35(4):763-768.
- Montero M., M. 1999. Factores de sitio que influyen en el crecimiento de *Tectona grandis* L. F. y *Bombacopsis quinata* (Jacq.) Dugand, en Costa Rica. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 63 p.
- Navarro, R. M., A. D. Del Campo, y J. Cortina. 2006. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. En: Cortina, J., J.L. Peñuelas, J. Puértolas, A. Vilagrosa, y R. Savé (Coord.). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes Mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. pp: 31-46
- Navarro R., M. y G. Palacios. 2004. Efecto de la calidad de planta, el procedimiento de preparación y la fecha de plantación en la supervivencia de una repoblación de *Pinus pinea* L. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Núm. 17. pp: 199-204.
- Querejeta, J. I., A Roldán, J. Albaladejo y V. Castillo. 2001. Soil water availability improved by site preparation in a *Pinus halepensis* afforestation under semiarid climate. *Forest Ecology and Management* 149: 115-128.
- Palmer, M. A., D. A. Falk and J. B. Zedler. 2006. Ecological theory and restoration ecology. In: D. A. Falk, M. A. Palmer & J. B. Zedler (eds). *Foundations of Restoration Ecology*. Washington, D.C: Island Press. pp. 1-9.
- Perry, P. J. 1991. The pines of Mexico and Central America. Timber Press. Portland, Oregon. 231 p.
- Pimentel B., L. 2008. Producción de árboles y arbustos de uso múltiple. Mundi-Prensa. México, D.F. 237 p.
- Prieto R., J. A. 2004. Factores que influyen en la producción de planta de *Pinus* spp. en vivero y en su establecimiento en campo. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de Nuevo León. Linares, N. L. 110 p.
- Prieto R., J. A., J. L. García R., J. M. Mejía B., S. Huchín A. y J. L. Aguilar V. 2009. Producción de planta del género *Pinus* en clima templado frío. Publicación Especial Núm. 28. INIFAP-Campo Experimental Valle del Guadiana. Durango, México. 48 p.
- Ramírez C., A. y D. A. Rodríguez T. 2004. Efecto de la calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*. 10(1): 5-11.w
- Rodríguez T., D. A. 2008. Indicadores de calidad de planta forestal. Mundi-Prensa. México, D. F. 156 p.

- Schlatter, J. E. 1977. La relación entre suelo y plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile Central. Análisis de la situación actual y planteamientos para su futuro manejo. *Bosque* 2(1): 12-31
- South, D. B. 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. Forestry and Wildlife Research Series N° 1. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, Alabama. 14 p.
- Taylor, M. M. 2007. Effect of plant date on subsequent seedling field performance. Thesis of Master Science. Oregon State University. 148 p.
- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation. What you can tell by looking. Duryea, M. L. (ed.). *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major test*. Oregon State University, Corvallis. pp: 59-71
- Toral I., M. 1997. Concepto de calidad de planta en viveros forestales. Documento Técnico 1. Programa de Desarrollo Forestal Integral de Jalisco. SEDER, Fundación Chile, Consejo Agropecuario de Jalisco. México. 28 p.
- Vance, E. D., D. A. Maguire and R. S. Zalesny Jr. 2010. Research strategies for increasing productivity of intensively managed forest plantations. *Journal of Forestry* 108:183-192.
- Verbyla, D. and R. Fisher. 1989. Effect of aspect on ponderosa pine height and diameter growth. *Forest Ecology and Management* 27(2):93-98.



Vista de la Sierra Madre Oriental, Iturbide, Nuevo León
Foto: Carlos A. Mora Donjuan
Enero de 2012

CAPÍTULO II

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Se utilizó planta de *Pinus pseudostrobus* producida en el Vivero Forestal del Bosque Escuela de la Facultad de Ciencias Forestales (UANL) ubicado en el Ejido Santa Rosa, municipio de Iturbide, Nuevo León, en las coordenadas 24° 42.37' N y 99° 51.69' O y altitud de 1608 m (Figura 2.1). Se trabajó con plántulas cultivadas en tres sistemas de producción: 1) plantas cultivadas en charola de poliestireno de 160 cavidades, 2) plantas cultivadas en bolsa de polietileno, y 3) plantas cultivadas en charola de poliestireno de 160 cavidades y trasplantadas a bolsa de polietileno (Cuadro 2.1).

En los tres sistemas el sustrato estaba compuesto por 57% turba de musgo y 43% tierra de monte, mas 5 kg/m³ de fertilizante de liberación controlada (Osmocote®). La planta se cultivó un año bajo condiciones de malla sombra y después, se pusieron a la intemperie, ello en el caso del sistema en bolsa de polietileno. Durante periodo de producción se aplicaron riegos cada tres días de acuerdo a las rutinas convencionales del vivero. Para caracterizar la morfología de las plantas en el vivero, en septiembre de 2011 se realizó un muestreo destructivo a una intensidad del 0.15% en cada lote de acuerdo a la metodología empleada por Prieto *et al.* (2009) (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Sistemas de producción evaluados en plántulas de *Pinus pseudostrobus* en el Vivero del Bosque Escuela (FCF-UANL).

Sistema de producción	Siembra	Vol. envase	Edad*	Población	Muestra
Charola de poliestireno 160 cavidades	Septiembre 2010	60 cm ³	1+0	50,000	75
Charola de poliestireno – Bolsa de polietileno	Septiembre 2009	60-560 cm ³	1+1	10,660	16
Bolsa de polietileno	Septiembre 2009	630 cm ³	2+0	21,330	32

*Edad en años, el primer carácter indica siembra directa y el segundo trasplante.

2.2 Preacondicionamiento de la planta

Además del muestreo destructivo, se seleccionaron 540 plantas (180 individuos por sistema de producción), los cuales se colocaron en una misma platabanda y se sometieron a preacondicionamiento durante 45 días mediante la modificación del régimen de riegos para inducir estrés hídrico; los niveles de preacondicionamiento fueron: 1) nivel bajo, se regaron diariamente durante la mañana; 2) nivel moderado, se regó a saturación cada nueve días; y 3) nivel alto, se regaron a saturación cada 15 días. Cada tratamiento constó de tres repeticiones con 20 plántulas por unidad experimental, distribuidas en un diseño de bloques completos al azar con un arreglo factorial 3x3 (tres sistemas de producción x tres niveles de preacondicionamiento). Después este periodo se tomó una muestra destructiva de 36 individuos por sistema de producción (108 plantas) para caracterizar nuevamente las variables morfológicas.

2.3 Evaluación de calidad de planta

En ambos muestreos, las plantas se evaluaron en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ciencias Forestales, donde se obtuvieron las variables morfológicas: altura del tallo (cm), tomada desde el cuello de la raíz hasta la yema apical y diámetro al cuello de la raíz (mm); también, se determinó la biomasa mediante la medición del peso anhidro (g) del material vegetal, el cual fue dividido en peso seco de la parte aérea y peso seco de la raíz, para lo cual las plantas se deshidrataron en estufa de secado a 60° C durante 72 horas.

2.4 Establecimiento de la plantación

En noviembre de 2011, las plantas restantes después del segundo muestreo destructivo, se plantaron en campo para evaluar su desempeño. El experimento se ubicó en el municipio de Galeana, Nuevo León, bajo las coordenadas 24° 50.81' N y 100° 5.55' O y 1760 m de altitud (Figura 2.1). La región presenta una precipitación media anual de 428 mm y una temperatura media de 14°C, mínima promedio de 4.7°C y máxima promedio de 32.6°C (CONAGUA, 2013). Durante el año 2012 se

presentó una temperatura ambiente promedio de 13°C y una precipitación acumulada de 548.2 mm (Figura 2.2).

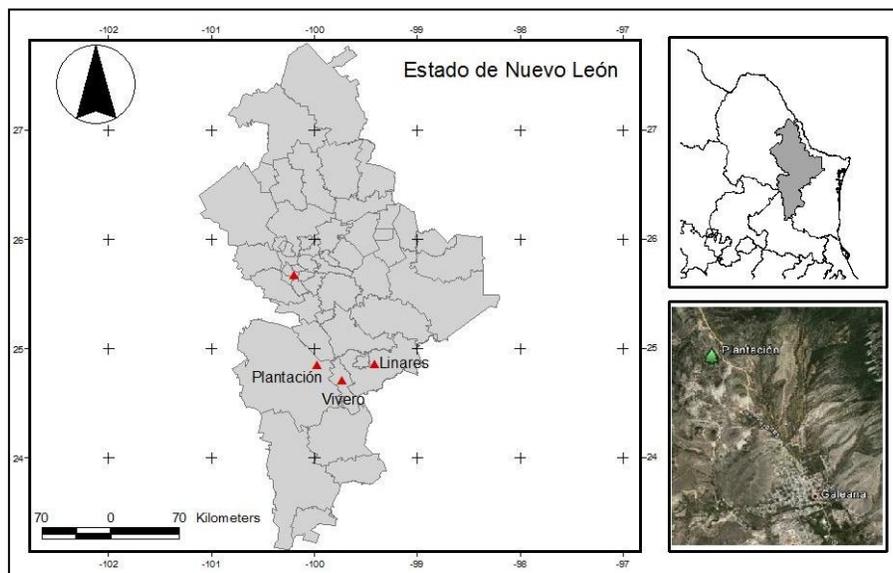


Figura 2.1. Ubicación geográfica del área de estudio

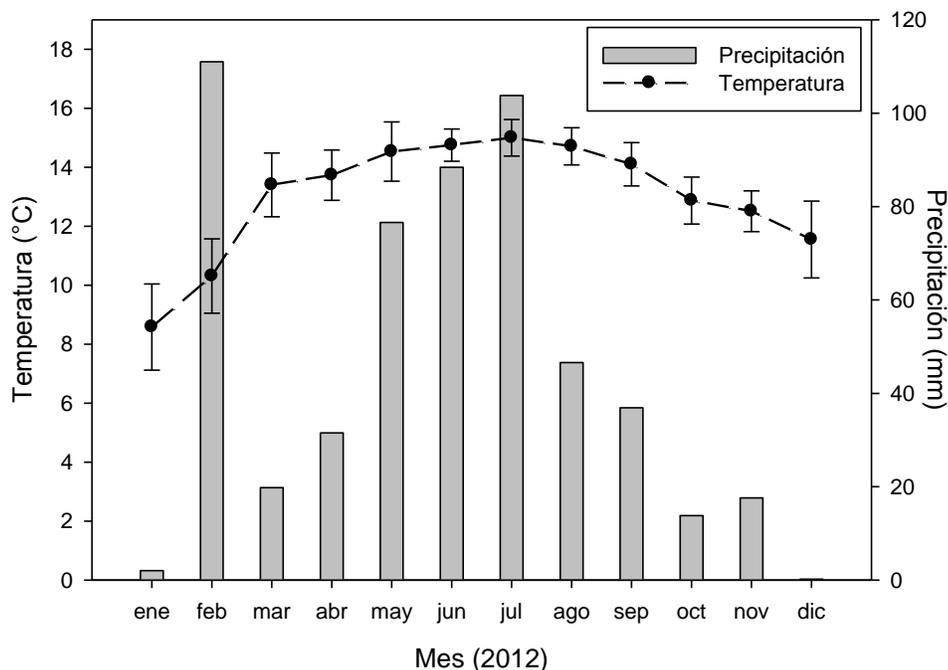


Figura 2.2. Temperatura al ambiente promedio y precipitación acumulada mensual en Galeana, N. L. durante el año 2012. Fuente: elaboración propia con datos de la CONAGUA.

En el área de plantación se eligieron dos sitios con condiciones edáficas y topográficas diferentes, separados a una distancia de 200 m (Cuadro 2.2). En cada sitio se establecieron 24 plantas por tratamiento divididas en tres repeticiones y plantadas a 1 m de separación, en total se plantaron 432 individuos. El diseño experimental fue en parcelas subdivididas, las parcelas grandes fueron los sitios, las medianas el sistema de producción y las parcelas chicas el nivel de preacondicionamiento.

Cuadro 2.2. Características de los sitios en donde se estableció la plantación

Característica	Sitio 1	Sitio 2
Pendiente (%)	10	55
Exposición	Noreste	Suroeste
Profundidad promedio del suelo (cm)	22.5	28.5
pH	7.8	7.8
Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	132.3	109.9
Densidad aparente (g/cm^3)	0.791	0.817
Materia orgánica (%)	7.66	4.21
Textura	Franco arcillo limosa	Franco arcillo limosa

2.5 Evaluación de supervivencia y crecimiento en campo

Al momento de plantar, se midieron las variables morfológicas iniciales para incluirlas como covariables y analizar su efecto en la supervivencia de cada tratamiento, las variables consideradas fueron: diámetro al cuello de la raíz (mm), altura del tallo (cm), peso seco de la parte aérea (PSA) y peso seco de la raíz (PSR) (g), así como la relación PSA/PSR y relación altura/diámetro (H/D). Después de plantar, cada mes se evaluó supervivencia durante los primeros nueve meses y se hizo una última evaluación a los 14 meses de establecimiento; en cada medición se asignaron valores de 0 a aquellas plantas que presentaran mortalidad visible en todas las acículas, y valores de 1 a las plantas que tuvieran al menos un brote vivo; al mismo tiempo, se registraron las variables diámetro a nivel del suelo (mm) y altura del tallo (cm).

2.6 Referencias

Prieto R., J. A., J. A. Sigala R., S. Pinedo L., J. L. García R., R. E. Madrid A., J. L. García P. y J. M. Mejía B. 2009. Calidad de planta en los viveros forestales del estado de Durango. Publicación especial No. 30. INIFAP-CEVAG. 81 p.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2013. Registro diario de temperatura y precipitación de la estación meteorológica 19085, Galeana, N. L. Archivo digital.



Vivero Forestal del Bosque Escuela (UANL), Iturbide, Nuevo León
Foto: Carlos A. Mora Donjuan
Octubre de 2011

CAPÍTULO III

3 CALIDAD DE PLANTA Y PREDICCIÓN DE BIOMASA EN PLÁNTULAS DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. CULTIVADO BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN VIVERO

3.1 Resumen

Se evaluó la calidad de planta de *Pinus pseudostrobus* cultivada en tres sistemas de producción y sometida a preacondicionamiento mediante la modificación del régimen de riegos; después, se desarrollaron ecuaciones alométricas para calcular la biomasa a partir de las variables morfológicas diámetro al cuello de la raíz (D) y altura del tallo (H) ó D^2H , con el objetivo de determinar si una ecuación alométrica general puede usarse para predecir la biomasa en las plántulas cultivadas bajo diferentes sistemas de producción, e identificar la variable (D, H ó D^2H) que presenta la mejor relación con la biomasa. Se efectuaron análisis de varianza, para detectar si existían diferencias de calidad de planta entre los tratamientos; además, se realizó un análisis de covarianza (ANCOVA) para probar la influencia del sistema de producción en la relación entre la biomasa y las variables independientes (D, H o D^2H). Se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de producción, pero no así en los niveles de preacondicionamiento. El ANCOVA mostró influencia del factor sistema de producción sobre el intercepto y pendiente de la relación entre biomasa y las variables independientes; los modelos completos por componente de biomasa (aérea, de raíz y total) presentaron mejor ajuste y precisión que los modelos reducidos generales sin considerar el sistema de producción. Para los tres componentes de biomasa, el diámetro fue la variable que explicó, en mayor proporción, la variación en la biomasa, aunque se observó mejor ajuste en los modelos cuando se incluyó D^2H como variable independiente.

3.2 Summary

Seedling quality of *Pinus pseudostrobus* was evaluated, which was grown under three different stock-types and preconditioned by modifying watering regime. Also, allometric equations to calculate biomass from morphological variables (root collar diameter (D), total height (H) or D^2H) were developed. The aim was to investigate if a general allometric equation could be used to predict biomass in seedlings growing under different stock-types and identify which of variables (D, H, or D^2H) is most related with biomass. Analysis of variance was conducted to detect significant differences between all treatments; also analysis of covariance was conducted to test the influence of stock-type on the relation between biomass and independent variables (D, H, or D^2H). Significant differences between stock-types were found but not between preconditioning levels. Analysis of covariance shows that intercept and slope of relations between biomass and independent variables was influenced by stock-type factor. Full models to predict biomass (shoot, root and total), considering stock-type factor had better goodness-fit statistics than reduced models. Root collar diameter explain most of variation of biomass for the three components, although we found best goodness-fit in models in which D^2H was included as independent variable.

3.3 Introducción

Las prácticas culturales en vivero tienen una fuerte influencia en la calidad de planta; por ello, es necesario entender estos efectos para tomar decisiones correctas en los proyectos de restauración (Grossnickle, 2012). En México, los responsables de los viveros mencionan que no emplean algún índice de calidad de planta (relación parte aérea/raíz, coeficiente de esbeltez o índice de calidad de Dickson) para decidir si la planta producida tiene los atributos requeridos para su establecimiento en campo, pero todos señalan que usan variables simples como la altura y diámetro al cuello de la raíz (CONAFOR, 2011).

De esta manera, los esfuerzos por definir estándares de calidad de planta para incrementar del desempeño en campo, están dirigidos principalmente a las características morfológicas, ya que son fácilmente cuantificadas (Dey & Parker, 1997). Sin embargo, existen variables que no se pueden calcular directamente y que son importantes, como la biomasa, que es un indicador de la eficiencia fisiológica de las plantas (Thompson, 1985) y mide de la respuesta de la regeneración a las condiciones ambientales de sitio, al manejo silvícola y a la calidad de planta obtenida por las prácticas de cultivo utilizadas en vivero (Ter-Mikaelian & Parker, 2000; Bloomberg *et al.*, 2008). La estimación de biomasa permite también calcular el balance tallo/raíz en plántulas cultivadas, la cual es una descripción lógica del desarrollo de la raíz en el suelo con relación a la biomasa aérea y refleja la capacidad de evitación a la sequía (Grossnickle, 2012) y su potencial de supervivencia y crecimiento en determinadas condiciones de sitio (Navarro *et al.*, 2006).

La cuantificación de la biomasa en plántulas producidas en vivero, implica mediciones mediante muestreos destructivos, lo que incrementa los costos de evaluación o bien, en lotes experimentales, limita la cantidad de plántulas para futuras mediciones (Ruehle *et al.*, 1984). Una alternativa para evitar mediciones destructivas ha sido el uso de relaciones alométricas entre biomasa y variables obtenidas por medio de mediciones no destructivas (Bloomberg *et al.*, 2008). La mayoría de las ecuaciones alométricas para calcular biomasa en árboles, están

enfocadas a plantaciones forestales o a rodales en etapas maduras (Geudens *et al.*, 2004), sin embargo, se ha demostrado que algunas variables como diámetro al cuello de la raíz (D), altura de la planta (H) y área foliar (A) así como algunas variables derivadas (D^2 o D^2H), tienen una fuerte asociación con la biomasa total de las plántulas en edades tempranas (Ruehle *et al.*, 1984; Geudens *et al.*, 2004; Bloomberg *et al.*, 2008).

Con base en lo anterior, es necesario identificar las relaciones alométricas en plántulas en función del sistema de producción utilizado en vivero, con la finalidad de tener estándares para la selección de plántulas con los atributos necesarios para un mejor desarrollo en los sitios de plantación y al mismo tiempo que apoyen en la adecuación las técnicas para producir lotes homogéneos.

3.4 Objetivos e hipótesis

3.4.1 Objetivos

- i) Determinar la calidad de planta de *Pinus pseudostrabus* cultivado bajo tres sistemas de producción en vivero y sometida a preacondicionamiento mediante la modificación del régimen de riegos.
- ii) Definir si es posible mediante una ecuación alométrica predecir la biomasa total de plántulas cultivadas bajo diferentes sistemas de producción en vivero.
- iii) Identificar la variable o variables morfológicas que mejor permitan predecir la producción de biomasa en las condiciones de cultivo.

3.4.2 Hipótesis nula

- i) El sistema de producción y preacondicionamiento no son factores que influyen en la calidad de planta de *Pinus pseudostrabus*.
- ii) No existe relación alométrica entre las variables morfológicas (D, H ó D^2H) y la biomasa de plántulas de *Pinus pseudostrabus* (aérea, de raíz y total)
- iii) Las variables D, H ó D^2H no son apropiadas para la predicción de biomasa en plántulas de *Pinus pseudostrabus* cultivadas en vivero.

3.5 Metodología

Del experimento realizado en el Vivero del Bosque Escuela (UANL) y descrito en el Capítulo II, se obtuvieron datos del primer muestreo destructivo realizado en septiembre de 2011 (123 plántulas), que sirvieron como datos de calibración para el desarrollo de las ecuaciones; mientras que los datos obtenidos del segundo muestreo destructivo en noviembre de 2011 (108 plántulas), fueron usados para el análisis de calidad de planta y como datos de validación de las ecuaciones (Cuadro 3.1).

Cuadro 3.1. Estadísticos descriptivos de los conjuntos de datos de calibración y validación para las variables usadas en el desarrollo de las ecuaciones.

	Diámetro (mm)	Altura (cm)	Peso seco (g)		
			Parte aérea	Raíz	Total
Datos de calibración (n=123)					
Mínimo	1.70	4.60	0.20	0.07	0.29
Máximo	8.40	35.30	10.84	2.42	12.93
Media	3.84	13.77	1.90	0.63	2.51
Desviación estándar	1.66	7.98	2.18	0.57	2.72
Datos de validación (n=108)					
Mínimo	2.08	5.80	0.20	0.10	0.34
Máximo	8.97	36.10	9.08	3.09	12.17
Media	4.75	16.67	2.51	1.11	3.61
Desviación estándar	1.62	7.67	1.86	0.75	2.57

3.5.1 Análisis de calidad de planta

Con los datos de las variables obtenidas después del periodo de preacondicionamiento se calcularon los siguientes índices: relación biomasa aérea/biomasa de la raíz (PSA/PSR), relación altura/diámetro (H/D) e índice de calidad de Dickson (ICD) (Dickson *et al.*, 1960).

$$ICD = \frac{PST (g)}{\frac{Altura (cm)}{Diámetro (mm)} + \frac{PSA (g)}{PSR (g)}} \quad (3.1)$$

Donde: PST=Peso seco total, PSA=Peso seco de la parte aérea, PSR=Peso seco de la raíz.

Por cada variable se efectuó un análisis de varianza (ANOVA), lo que permitió determinar si existían diferencias entre los tratamientos evaluados. El ANOVA se realizó mediante el procedimiento GLM de SAS ver. 9.2 (2009). Las medias significativas se clasificaron de acuerdo a las prueba de rangos múltiple de Duncan ($\alpha=0.05$). El modelo lineal utilizado para el análisis fue:

$$\gamma_{ij} = \mu + \beta_i + \tau_j + (\beta\tau_{ij}) + \varepsilon_{ij} \quad (3.2)$$

Donde: γ_{ij} = Variable respuesta, μ = Efecto medio general, β_i =Efecto atribuido al i-ésimo bloque de nivel de preacondicionamiento, τ_j =Efecto atribuido al j-ésimo sistema de producción de la planta, $\beta\tau_{ij}$ = Interacción entre el nivel de preacondicionamiento y sistema de producción, ε_{ij} =Término de error aleatorio.

3.5.2 Desarrollo de ecuaciones

El modelo más adecuado para describir la relación entre biomasa y las variables diámetro y altura de las plántulas es:

$$W = \beta_0 X^{\beta_1} \quad (3.3)$$

Donde: W = peso seco; X = diámetro (D), altura (H) o D^2H ; β_0 y β_1 son los parámetros constantes (Ter-Mikaelian and Parker, 2000; Bloomberg *et al.*, 2008). La relación en la Ecuación 3.3 puede ser convertida a la forma lineal mediante la transformación logarítmica de las variables, de la siguiente manera (Ter-Mikaelian & Parker, 2000):

$$\ln W = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X \quad (3.4)$$

Esta relación lineal se observa en la Figura 3.1; sin embargo, se encontró un aparente efecto del factor sistema de producción en el intercepto y la pendiente de los modelos, por ello la Ecuación 3.4 fue especificada como un modelo de análisis de covarianza (ANCOVA) donde D, H o D^2H fue la variable continua independiente (covariable) y el sistema de producción fue el efecto fijo (Bloomberg *et al.*, 2008), el modelo fue de la siguiente forma:

$$\ln W_{ij} = (\mu + \alpha_i) + (\beta_j + \gamma_i) \ln X_{ij} \quad (3.5)$$

Donde: W_{ij} es el valor esperado de peso seco para una planta individual, X_{ij} es el valor de la variable independiente (covariable) para la planta individual, μ es el intercepto y β es la pendiente de la relación peso seco y la covariable; y α_i y γ_i son las diferencias en intercepto y pendiente entre los sistemas de producción (charola

de poliestireno 1+0 [$i = 1$], bolsa de polietileno 2+0 [$i = 2$] y bolsa de polietileno 1+1 [$i = 3$]); por lo tanto, en la Ecuación 3.4, $\beta_0 = (\mu + \alpha_i)$ y $\beta_1 = (\beta + \gamma_i)$.

La Ecuación 3.4 describe un modelo completo con parámetros β_0 y β_1 (intercepto y pendiente) diferentes en cada sistema de producción, mientras que la Ecuación 3.5 describe un modelo reducido con parámetros β_0 y β_1 iguales para los tres sistemas de producción, el cual asume que el sistema de producción no influye en el intercepto y/o la pendiente de la relación entre biomasa de la planta y las variables independientes.

Ambos modelos (Ecuaciones 3.4 y 3.5) fueron reproducidos para los datos de calibración (Cuadro 3.1) mediante el procedimiento GLM de SAS ver. 9.2 (2009). Se usó la prueba de t ($\alpha < 0.05$) para probar la significancia estadística de los parámetros en cada modelo. Si los parámetros α_i y γ_i de la Ecuación 3.5, eran estadísticamente significativos, la conclusión sería que las plántulas cultivadas en cada sistema de producción difieren en sus relaciones alométricas entre el peso seco y la variable independiente. Finalmente se contrastó el modelo reducido contra el completo para ver si diferían significativamente mediante los estadísticos de F obtenidos en el análisis de varianza de cada modelo (Cuadro 3.5) (Ter-Mikaelian & Parker, 2000).

3.5.3 Validación de ecuaciones

Para probar el grado de ajuste de los modelos, se calculó la biomasa en los datos de validación con las ecuaciones generadas. Como los modelos no fueron desarrollados con unidades aritméticas sino con unidades logarítmicas, la ecuación fue transformada a su forma original (Ec. 3.3) y se sumó la mitad del error estándar al cuadrado ($1/2 (SE)^2$) al intercepto $\ln(\beta_0)$ para corregir el sesgo introducido por la transformación logarítmica (Sprugel, 1983). El ajuste de los datos de validación para los modelos reducidos y completos fue probado usando el Error Relativo de Predicción (%) calculado como la diferencia entre el valor observado y predicho dividido por el valor observado, donde el valor de biomasa predicho por el modelo fue comparado con el valor observado en los datos de validación (Ter-Mikaelian & Parker, 2000).

3.6 Resultados y discusión

3.6.1 Calidad de planta

Se encontró una influencia altamente significativa ($p < 0.0001$) del sistema de producción sobre las variables morfológicas, con mayores valores en las plántulas cultivadas en bolsa de polietileno (2+0 y 1+1). El efecto del precondicionamiento no fue significativo en ninguna de las variables morfológicas, sin embargo la interacción sistema x precondicionamiento fue significativa, lo que significa que en cada sistema de producción, la disminución de riego presentó un efecto diferente en las variables evaluadas (Cuadro 3.2).

Cuadro 3.2. Media y error estándar de las características iniciales de las plantas de *Pinus pseudostrobus* previo al establecimiento de la plantación.

Trat*	Diám. (mm)	Altura (cm)	Peso seco (g)		PSA/PSR	H/D	ICD
			Aéreo	Raíz			
Cs-B	2.7(0.06) ^d	10.2(0.32) ^d	0.6(0.03) ^d	0.2(0.01) ^c	2.4(0.05) ^d	3.8(0.12) ^d	0.14(0.01) ^d
Cs-M	2.9(0.06) ^d	10.6(0.36) ^d	0.7(0.03) ^d	0.3(0.01) ^c	2.4(0.05) ^d	3.6(0.11) ^d	0.16(0.01) ^c
Cs-A	2.7(0.06) ^d	10.7(0.26) ^d	0.6(0.03) ^d	0.2(0.01) ^c	2.5(0.04) ^d	3.9(0.09) ^d	0.14(0.01) ^d
Bt-B	5.9(0.14) ^a	16.4(0.46) ^b	3.1(0.12) ^b	1.1(0.04) ^b	3.0(0.08) ^b	2.8(0.09) ^c	0.74(0.04) ^{ab}
Bt-M	5.8(0.12) ^{ab}	16.7(0.51) ^b	3.0(0.11) ^b	1.0(0.03) ^b	3.0(0.08) ^b	2.9(0.08) ^c	0.69(0.03) ^{ab}
Bt-A	5.4(0.11) ^{bc}	14.2(0.38) ^c	2.5(0.09) ^c	0.9(0.03) ^b	2.7(0.06) ^c	2.7(0.07) ^c	0.66(0.02) ^{ab}
Bs-B	5.8(0.23) ^{ab}	24.8(0.99) ^a	4.8(0.40) ^a	1.4(0.08) ^a	3.2(0.08) ^a	4.4(0.14) ^b	0.80(0.06) ^a
Bs-M	5.2(0.14) ^c	25.1(0.85) ^a	4.0(0.22) ^a	1.2(0.05) ^a	3.1(0.06) ^{ab}	4.9(0.15) ^a	0.65(0.03) ^b
Bs-A	5.7(0.15) ^{ab}	25.4(1.01) ^a	4.7(0.31) ^a	1.4(0.06) ^a	3.2(0.07) ^a	4.5(0.14) ^b	0.77(0.04) ^a

*Tratamientos: Sistema de producción (Cs= Charola de poliestireno [1+0], Bt=Trasplante en bolsa [1+1] y Bs= Siembra en bolsa [2+0]); Precondicionamiento (B=Nivel bajo [riego diario], M= Nivel moderado [riego cada 9 días]; A= Nivel alto [riego cada 15 días]). Prueba de Duncan: en cada columna, letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0.05$). Los valores entre paréntesis indica el error estándar.

En otro estudio con *P. pseudostrobus*, Domínguez *et al.* (2005), también encontraron una mayor talla y producción de biomasa en las plántulas de *P. pseudostrobus* cultivadas en bolsa de 400 cm³ y contenedor de 160 cm³; asimismo, Prieto *et al.* (2007) obtuvieron mejores resultados con plántulas de *P. cooperi* producidas en envases de mayor volumen. En este sentido, South & Mitchell (2005) mencionan que el tipo y tamaño del contenedor determina cuánto tiempo la plántula puede permanecer en el vivero sin que presente ligado o ahorcamiento de la raíz, por

lo tanto, las plántulas cultivadas en 600 cm³ pueden permanecer más tiempo en el vivero que las plántulas cultivadas en contenedores de 60 cm³.

También, fue notoria la diferencia entre las plántulas sembradas directamente en la bolsa (2+0) y las que fueron trasplantadas (1+1), principalmente en la altura y producción de biomasa; se observaron mayores valores en las plántulas sembradas directamente, no obstante, estas presentaron menor equilibrio en la relación PSA/PSR; además, se observaron algunas deformaciones en la raíz. Resultado similar se encontró en un estudio con *Pinus palustris*, donde existió una tendencia a la disminución de la calidad de la planta cuando el tamaño de la planta fue demasiado grande para el tamaño del contenedor (South *et al.*, 2005). También, el estrés por el trasplante se puede traducir en una disminución del crecimiento, pero puede influir en una mejor relación parte aérea/raíz y mejor conformación del sistema radical (Ortega *et al.*, 2006).

Por otra parte, el preacondicionamiento mediante la modificación del régimen de riegos, no presentó efecto significativo en la morfología de las plantas, salvo en algunas variables como PSA/PSR y ICD a través de la interacción sistema de producción x preacondicionamiento, observándose menores valores en plantas con un nivel alto de estrés. En otros estudios se han obtenido resultados significativos como el de Prieto *et al.* (2007), quienes encontraron que la restricción de riego (cada 96 y 168 horas) en *Pinus cooperi* produjo menores parámetros morfológicos comparado con las plantas que estuvieron sometidas a riegos constantes cada dos días; asimismo, en *P. engelmannii*, la reducción del potencial hídrico hasta -2,29 MPa limitó su crecimiento en altura, diámetro del cuello y producción de biomasa, en contraste con el tratamiento sin restricción de humedad, que se mantuvo a potenciales hídricos entre -0,13 y -0,20 MPa, aunque en ninguno de los casos se observaron daños físicos (Prieto *et al.*, 2004).

También en *P. halepensis*, Villar *et al.* (1997) demostraron que el sometimiento de las plántulas a estrés hídrico provoca una disminución de la transpiración cuticular en los tratamientos de mayor nivel de preacondicionamiento,

sin reducir el contenido de nutrientes. En este caso, posiblemente la duración del periodo de precondicionamiento fue insuficiente para que las plántulas presentaran una respuesta significativa; ya que en otro estudio con *Quercus suber*, el riego mínimo produjo una reducción en la altura de los brinzales hasta los 4 meses de iniciados los tratamientos (Chirino *et al.*, 2004).

Por su parte, Vilagrosa *et al.* (2006) menciona que la respuesta al precondicionamiento difiere entre especies, ya que existen especies de climas mediterráneos que muestran reducción en la capacidad para generar nuevas raíces y en otras la tendencia es al contrario. Por esta razón, el precondicionamiento mediante sequía inducida en vivero, sigue siendo una técnica controversial entre los especialistas y técnicos viveristas (Vallejo *et al.*, 2012), de esta manera, es necesario considerar el hábito de crecimiento de cada especie para saber qué prácticas en vivero son las adecuadas para la inducción de la resistencia al estrés en campo.

3.6.2 Predicción de biomasa

3.6.2.1 Calibración de ecuaciones

En la Figura 3.1 se presenta la relación entre la biomasa total de las plantas y las variables morfológicas explicativas (D y D²H) de acuerdo a la modelo lineal después de la transformación logarítmica (Ecuación 3.4), en la cual se observa una tendencia diferente para cada sistema de producción.

El modelo reducido ajustado a la forma lineal (Ecuación 3.4) presentó alta significancia estadística ($p < 0.0001$) para todas relaciones alométricas. En todas las ecuaciones, el ajuste presentó valores de $R^2 > 0.90$ encontrándose mejor ajuste y menor error estándar en las ecuaciones donde se incluyeron las variables independientes diámetro (D) y altura (H), aunque se encontró que el diámetro como variable independiente explica la mayor parte de la variación en la biomasa; Ter-Mikaelian & Parker (2000), también encontraron una estrecha relación entre la biomasa en la parte aérea y el diámetro a la base del suelo en plántulas de *Picea glauca*.

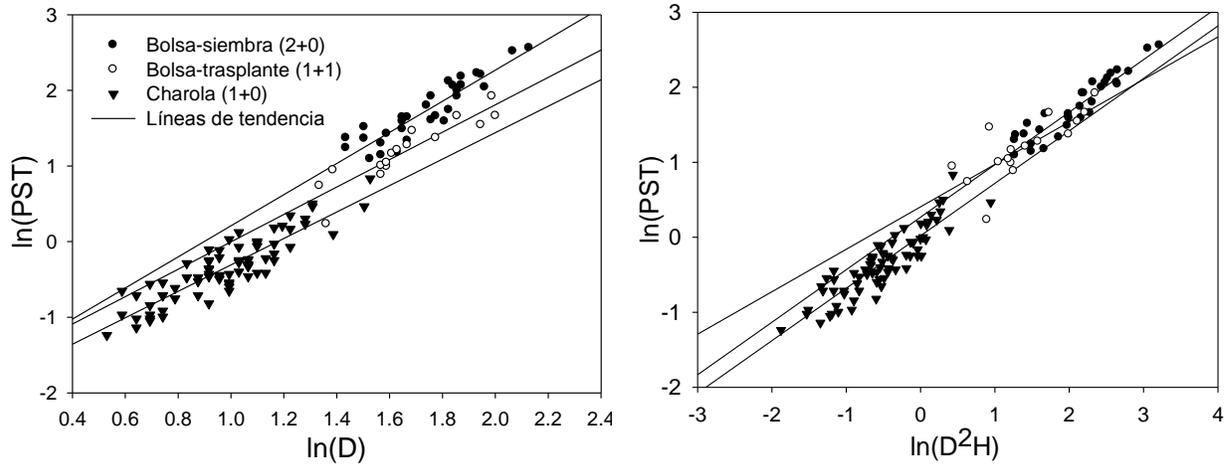


Figura 3.1. Dispersión de datos de peso seco total ($\ln\text{PST}$) contra las variables independientes ($\ln D$ y $\ln D^2H$) y líneas de tendencia en la forma $\ln W = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X$ para cada sistema de producción.

En los tres modelos probados (D , D^2H y D , H) se obtuvo menor ajuste en las ecuaciones para calcular biomasa de la raíz (PSR) con valores de R^2 inferiores a 0.91, en cambio para las variables peso seco de la parte aérea (PSA) y peso seco total (PST) se observó mayor ajuste de los modelos, con valores de R^2 entre 0.94 y 0.97 (Cuadro 3.3).

Cuadro 3.3. Parámetros del modelo reducido ajustado a la forma lineal después de la transformación logarítmica ($\ln W = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln X$).

Y	X	β_0 (SE*)	β_1	β_2	R^2	SE*	P>F
PSA	D	-3.176 (0.079)	2.547 (0.059)	---	0.94	0.272	<0.0001
PSA	D2H	-0.290 (0.019)	0.824 (0.014)	---	0.96	0.203	<0.0001
PSA	D,H	-3.958 (0.097)	1.803 (0.086)	0.694 (0.069)	0.97	0.201	<0.0001
PSR	D	-3.477 (0.083)	2.07 (0.062)	---	0.90	0.285	<0.0001
PSR	D2H	-1.127 (0.027)	0.661 (0.02)	---	0.90	0.282	<0.0001
PSR	D,H	-3.877 (0.131)	1.69 (0.116)	0.355 (0.093)	0.91	0.270	<0.0001
PST	D	-2.651 (0.072)	2.41 (0.054)	---	0.94	0.249	<0.0001
PST	D2H	0.081 (0.019)	0.777 (0.014)	---	0.96	0.198	<0.0001
PST	D,H	-3.326 (0.093)	1.769 (0.083)	0.598 (0.066)	0.96	0.193	<0.0001

*SE=Error estándar en unidades logarítmicas

El Cuadro 3.4 muestra que el modelo completo, usando D como variable independiente, el sistema de producción no tiene un efecto significativo en el intercepto y la pendiente, aunque en el sistema 2+0 de siembra directa en bolsa de polietileno se observó mayor influencia en la pendiente del modelo con un valor del

estimador de 0.310 ($p=0.146$) comparado con el sistema en charola (1+0). Por otra parte, usando la variable D^2H como variable independiente en el modelo completo, se encontró una influencia significativa del sistema de producción 1+1 en el intercepto de la relación entre el peso seco total (PST) y D^2H , comparado con el sistema en charola (1+0) ($p=0.005$), mientras el sistema 2+0 no tuvo efecto significativo en el intercepto y la pendiente comparado con el sistema 1+0. Esta influencia también fue significativa para el peso seco de la parte aérea (PSA); sin embargo, para el peso seco de la raíz (PSR) no se encontró un efecto significativo del sistema de producción en el intercepto y pendiente de la relación alométrica.

En un estudio con *Pinus radiata*, Bloomberg *et al.* (2008), encontraron influencia del nivel de densidad de luz en la relación entre biomasa y D^2H o D^2 . De la misma manera, al usar el D y la H como variables independientes en relación con PST, se encontró un efecto significativo del sistema trasplante 1+1 tanto en el intercepto ($p=0.003$) como en la pendiente del modelo ($p=0.091$ y $p=0.001$ para D y H respectivamente); también, el efecto fue significativo para la relación entre PSA y las variables D ($p<0.0001$) y H ($p<0.0001$); en cambio, para PSR el sistema de producción no influyó significativamente en el intercepto y pendiente de la relación con las variables independientes (Cuadro 3.4).

Se encontró que el estimador de la pendiente en el sistema de producción 1+1 fue negativo para la variable altura (H) en los tres componentes de biomasa, lo que se explica por la afectación del trasplante en el crecimiento de las plántulas en el sistema 1+1; es decir, el trasplante afectó negativamente el crecimiento en altura y con ello se modificó la relación entre altura, diámetro y peso seco, con ello en este sistema de producción se presentó una reducción significativa de la biomasa en las plántulas. En este sentido, Geudens *et al.* (2004) encontraron que la edad debe ser considerada como variable predictiva de la biomasa en la parte aérea y raíces gruesas en plántulas de *Pinus sylvestris*.

Cuadro 3.4. Estimadores de los parámetros en los modelos completos ANCOVA ($\ln W_{ij} = (\mu + \alpha_i) + (\beta_j + \gamma_i) \ln X_{ij}$) para el peso seco de cada componente en función de diámetro, altura y el sistema de producción.

Parámetro*	Símbolo	Peso seco de parte aérea			Peso seco de raíz			Peso seco total			
		Estimador	Valor t	Pr>t	Estimador	Valor t	Pr>t	Estimador	Valor t	Pr>t	
Constante	μ	-2.504	-23.21	<0.0001	-3.121	-22.21	<0.0001	-2.055	-20.66	<0.0001	
Sist. Prod.	Bs [2+0]	α_2	0.101	0.27	0.785	0.776	1.61	0.110	0.207	0.61	0.545
	Bt [1+1]	α_3	0.254	0.60	0.550	0.372	0.67	0.502	0.240	0.61	0.540
D	β_1	1.803	16.66	<0.0001	1.668	11.84	<0.0001	1.748	17.53	<0.0001	
D*Sist.Prod	Bs [2+0]	γ_2	0.419	1.83	0.071	-0.166	-0.56	0.580	0.310	1.46	0.146
	Bt [1+1]	γ_3	0.085	0.32	0.751	-0.105	-0.30	0.765	0.064	0.26	0.797
			$R^2=0.968$	$SE=0.199$				$R^2=0.921$	$SE=0.259$		
Constante	μ	-0.354	-11.09	<0.0001	-1.162	-25.39	<0.0001	0.021	0.66	0.513	
Sist. Prod.	Bs [2+0]	α_2	0.238	1.63	0.105	0.350	1.67	0.097	0.249	1.74	0.085
	Bt [1+1]	α_3	0.421	3.08	0.003	0.324	1.66	0.100	0.386	2.88	0.005
D ² H	β_1	0.739	17.42	<0.0001	0.628	10.33	<0.0001	0.699	16.81	<0.0001	
D ² H *Sist.	Bs [2+0]	γ_2	0.016	0.20	0.839	-0.111	-0.99	0.324	0.001	0.01	0.990
	Bt [1+1]	γ_3	-0.151	-1.53	0.129	-0.136	-0.96	0.338	-0.133	-1.38	0.171
			$R^2=0.969$	$SE=0.195$				$R^2=0.908$	$SE=0.280$		
Constante	μ	-3.457	-15.74	<0.0001	-3.157	-9.77	<0.0001	-2.714	-12.88	<0.0001	
Sist. Prod.	Bs [2+0]	α_2	0.041	0.08	0.937	0.000	0.00	1.000	-0.087	-0.18	0.860
	Bt [1+1]	α_3	2.075	3.56	0.001	1.059	1.24	0.219	1.708	3.06	0.003
D	β_1	1.615	15.67	<0.0001	1.661	10.95	<0.0001	1.618	16.35	<0.0001	
H	β_2	0.064	0.23	0.819	-0.594	-1.46	0.148	0.370	3.47	0.001	
D*Sist.Prod	Bs [2+0]	γ_{21}	0.526	1.97	0.051	0.092	0.23	0.815	-0.072	-0.27	0.788
	Bt [1+1]	γ_{31}	0.534	4.81	<0.0001	0.020	0.12	0.903	0.429	1.68	0.096
H*Sist.Prod.	Bs [2+0]	γ_{22}	0.074	0.32	0.753	0.468	1.35	0.180	0.204	0.90	0.370
	Bt [1+1]	γ_{32}	-1.016	-4.09	<0.0001	-0.381	-1.04	0.299	-0.818	-3.44	0.001
			$R^2=0.975$	$SE=0.175$				$R^2=0.924$	$SE=0.258$		
									$R^2=0.975$	$SE=0.168$	

*Los parámetros están especificados en la Ecuación 3.5

En la Figura 3.2, se observa que la relación entre peso seco total (PST) y D tiene una tendencia similar en cada sistema producción así como para el modelo reducido; en cambio, cuando se incluye la variable altura de la forma D^2H , esta relación difiere para los tres sistemas de producción.

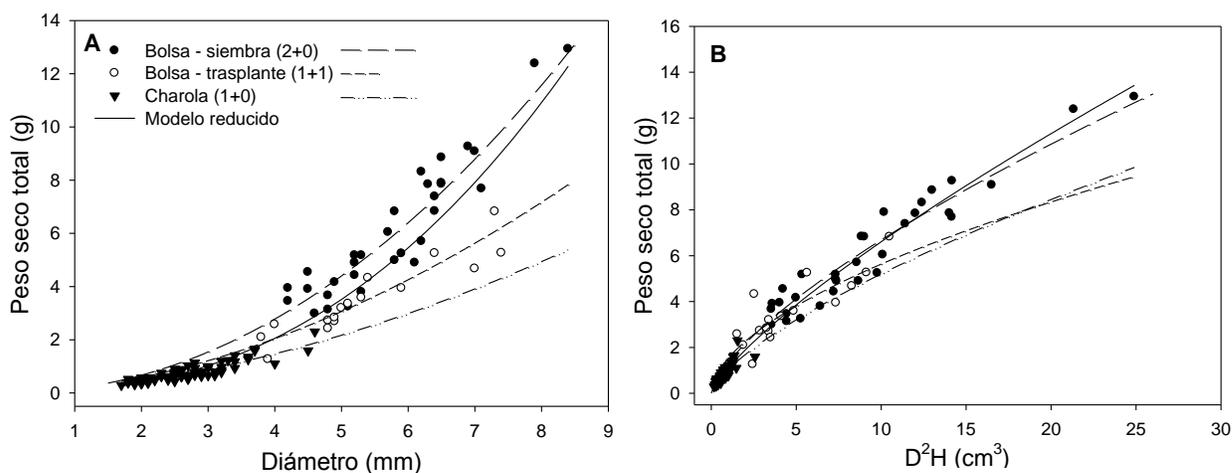


Figura 3.2. Peso seco total en función de D (A) ó D^2H (B): modelo completo para los diferentes sistemas de producción, así como el modelo reducido sin considerar el sistema de producción.

3.6.2.2 Validación de ecuaciones

Las ecuaciones alométricas obtenidas con los datos de calibración sin considerar el efecto del sistema de producción (modelo reducido) fueron estadísticamente diferentes de aquellas en las que se consideró el sistema de producción por separado (modelo completo) (Cuadro 3.5). Los resultados fueron similares para todos los componentes de biomasa, excepto la ecuación en la que se usó la variable D^2H para predecir el peso seco de la raíz, la cual no mostró diferencias significativas en entre el modelo reducido y el modelo completo. Las diferencias fueron mayores en las ecuaciones para calcular biomasa de la parte aérea, lo que sugiere que el uso de ecuaciones específicas para cada sistema de producción, tendrá mejores predicciones que un modelo general en el cálculo de biomasa en dicho componente.

Ter-Mikaelian & Parker (2000) sugieren que el uso de ecuaciones alométricas para tratamientos específicos pueden incrementar las predicciones para biomasa de la parte aérea y biomasa foliar. Si bien, la morfología de la raíz es menos considerada que la morfología de la parte aérea, se sabe que existen diferencias dependiendo del tipo de sistema de producción (raíz desnuda, trasplante o contenedor) (Mattsson, 1996).

Cuadro 3.5. Resultados (valores de F y P) de la comparación de el modelo completo (por cada sistema de producción) con el modelo reducido para cada componte de biomasa.

Componente	Variable independiente					
	D		D ² H		D, H	
	$F(4,117)$	$P > F$	$F(4,117)$	$P > F$	$F(6,114)$	$P > F$
Parte aérea	27.0590	<.0001	7.3612	<.0001	26.4735	<.0001
Raíz	3.4775	0.0101	1.3372	0.2603	3.1470	0.0169
Total	7.2645	<.0001	2.9143	0.0111	7.2967	<.0001

El Cuadro 3.6 resume promedios y desviación estándar del Error Relativo de Predicción para los modelos usando los datos de validación. Estos resultados muestran la superioridad de los modelos completos cuando se usa D²H para predecir la biomasa aérea y total con menor error relativo de predicción y menor desviación estándar; en el caso la biomasa en la raíz se estimó con menor error relativo usando las variables D y H en el modelo reducido. Igualmente, en el estudio de Bloomberg *et al.* (2008), los modelos completos que incluían el nivel de densidad de luz, tuvieron mayor exactitud al predecir biomasa que los modelos reducidos en los que no se consideró el nivel de densidad de luz.

Cuadro 3.6. Media y desviación estándar de error relativo de predicción (RPE) para el conjunto de datos de validación.

Modelo	Biomasa de la parte aérea		Biomasa de la raíz		Biomasa total	
	Media (%)	S.D. (%)	Media (%)	S.D. (%)	Media (%)	S.D. (%)
Modelo reducido						
<i>D</i>	16.38	34.17	-6.78	28.99	7.66	27.79
<i>D²H</i>	10.29	23.97	-8.56	29.56	3.19	21.66
<i>D, H</i>	10.86	23.61	-8.09	27.64	3.80	20.73
Modelo completo						
<i>D*Sist.Prod.</i>	9.58	26.86	-9.45	27.43	2.30	22.83
<i>D²H*Sist.Prod.</i>	9.49	23.19	-8.36	28.37	2.65	20.80
<i>D*Sist., H*Sist.</i>	10.67	27.55	-9.15	28.00	3.16	23.54

Estos resultados son corroborados en la Figura 3.3, que describe el peso seco total predicho contra el peso seco total observado para los datos de validación. Las gráficas muestran que las predicciones de los modelos completos aparentan ser más precisos que los modelos reducidos. La diferencia es mayor cuando se usa *D* como variable independiente, ya que el modelo reducido subestima la biomasa en el sistema 1+1 y la sobrestima para el sistema 2+0. Por otro lado, cuando se incluye la variable altura (*D²H* o *D, H*), la diferencia en la precisión de la predicción entre el modelo completo y el reducido es menor.

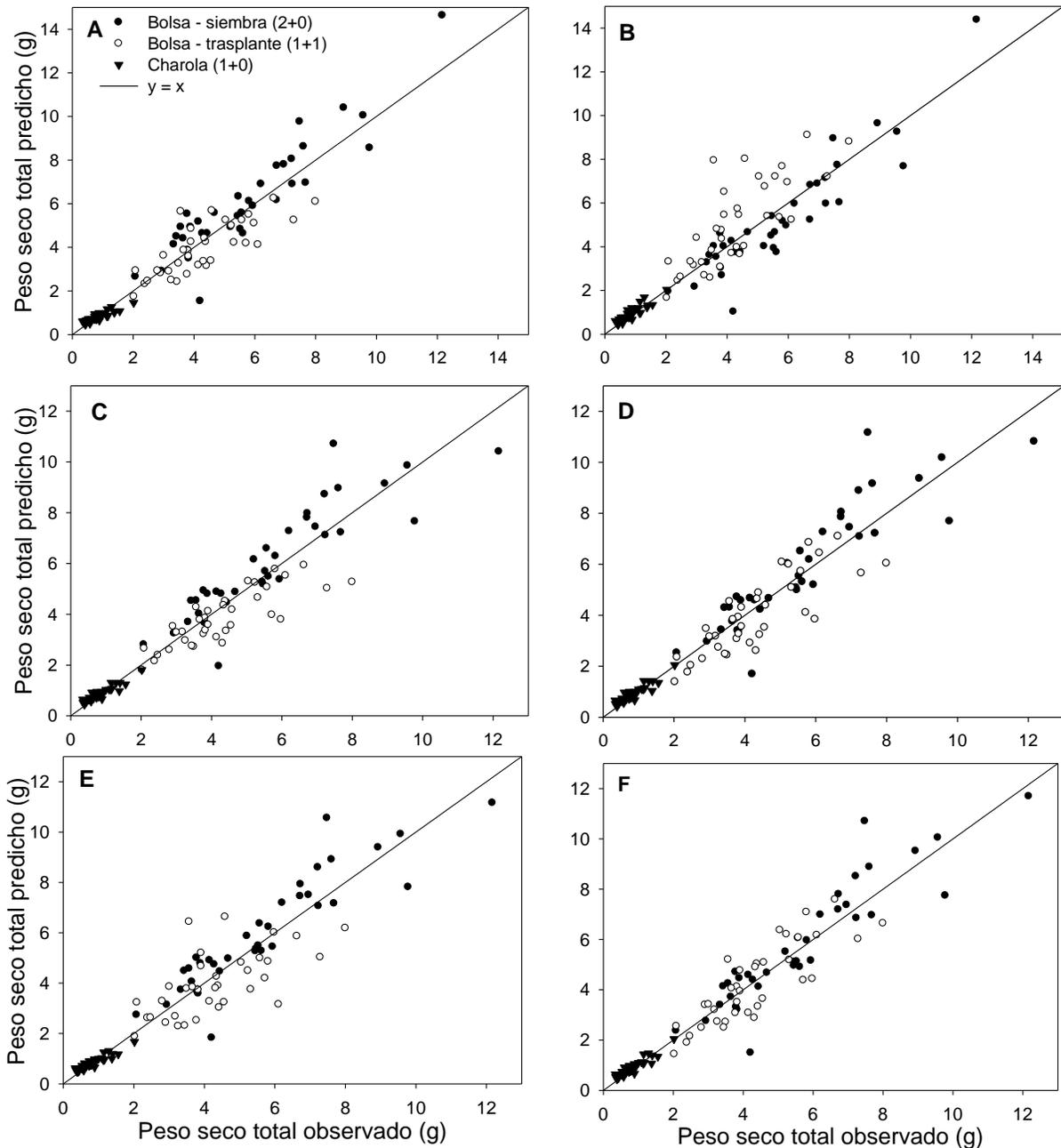


Figura 3.3. Peso seco total predicho contra peso seco observado en los datos de validación (n=108). Modelo completo para D (A), D^2H (C) y D, H (E) y modelo reducido para D (B), D^2H (D) y D, H (F).

3.7 Conclusiones

En plántulas de *Pinus pseudostrobus*, las variables morfológicas fueron afectadas por el sistema de producción. Aunque el precondicionamiento, mediante la restricción de riegos, no tuvo un efecto significativo en la morfología de la planta,

se asume que un periodo de preacondicionamiento mas largo modificaría algunas características morfológicas y fisiológicas.

Es posible estimar la biomasa de plántulas de *P. pseudostrobus* mediante variables morfológicas, considerando el efecto del sistema de producción en la relación alométrica.

El diámetro al cuello de la raíz está estrechamente relacionado con la biomasa (parte aérea, raíz y total) en plántulas de *Pinus pseudostrobus*, aunque cuando se incluye la variable altura se mejoran estadísticos de ajuste en los modelos; de ahí que al incluir la variable altura en el modelo, es posible observar en mayor grado el efecto del sistema de producción en la relación entre la biomasa y las variables independientes.

3.8 Referencias

- Bloomberg, M., E. G. Mason, P. Jarvis and R. Sedcole. 2008. Predicting seedling biomass of radiata pine from allometric variables. *New Forests* 36:103–114.
- Chirino, M., E., A. Vilagrosa C. y E. Rubio A. 2004. Efectos en la reducción del riego y la fertilización en las características morfológicas de *Quercus suber*. Cuaderno de la Sociedad Española de Ciencias Forestales. 17:51-56.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2011. Indicadores de gestión de desempeño del programa PROCOREF durante el ejercicio fiscal 2010. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). En línea. Disponible en: <http://www.cnf.gob.mx:8080/snif/portal/evaluaciones/documentos-y-alcances-de-las-evaluaciones>. Fecha de consulta: 23/01/2013.
- Dey, D. C. and W. C. Parker. 1997. Morphological indicators of stock quality and field performance of red oak (*Quercus rubra* L.) seedlings underplanted in a central Ontario shelterwood. *New Forests* 14: 145–156.
- Dickson, A., A. L. Leaf and J. F. Hosner. 1960. Seedling quality-soil fertility relationships of white spruce and red and white pine in nurseries. *Forestry Chronicle* 36: 237-241.
- Domínguez, P. A., J. Navar, C. Hernández and J. Tienda. 2005. Factors influencing the quality of nursery seedlings of *Pinus pseudostrobus* Lindl. *Tree Planters' Notes* 51(1):47-52.
- Geudens, G., J. Staelens, V. Kint, R. Goris and N. Lust. 2004. Allometric biomass equations for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings during the first years of establishment in dense natural regeneration. *Annals of Forest Sciences* 61:653–659.

- Grossnickle S. C. 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43:711–738.
- Jackson, D. P., R. K. Dumroese and J. P. Barnett. 2012. Nursery response of container *Pinus palustris* seedlings to nitrogen supply and subsequent effects on outplanting performance. *Forest Ecology and Management* 265: 1–12.
- Mattsson A. 1996. Predicting field performance using seedling quality assessment. *New Forests* 13: 223–248.
- Navarro, R. M, A. del Campo y J. Cortina. 2006. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. En: Cortina et al. (coords.). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos: Estado actual de conocimientos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales-Ministerio de Medio Ambiente. Madrid, España. pp. 31-46.
- Ortega, U., J. Majada, A. Mena P., J. Sanchez Z., N. Rodriguez I., K. Txarterina, J. Azpitarte and M. Duñabeitia. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests* 31:97–112.
- Prieto R., J. A., E. H. Cornejo O., P. A. Domínguez C., J. J. Navar Ch, J G. Marmolejo M. y J. Jiménez P. 2004. Estrés hídrico en *Pinus engelmannii* Carr., producido en vivero. *Invest Agrar: Sist. Recur. For.* 13(3): 443-451.
- Prieto R., J. A., P. A. Domínguez C., E. H. Cornejo O. y J. J. Navar Ch. 2007. Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos condiciones de sitio. *Madera y Bosques* 13(1):79-97.
- Rose, R. and D. L. Haase. 2005. Root and shoot allometry of bareroot and container Douglas-fir seedlings. *New Forests* 30:215–233
- Ruehle, J. L., D. H. Marx and H. D. Muse. 1984. Calculated nondestructive indices of growth response for young pine seedlings. *Forest Science* 30(2):469-474.
- Sprugel, D. G. 1983. Correcting for bias in Log-transformation allometric equations. *Ecology* 64(1):209-210.
- South, D. B. and R. G. Mitchell. 2005. A root-bound index for container-grown Pines. In: Colombo S.J. (com). *The Thin Green Line: A symposium on the state-of-the-art in reforestation*. Forest Research Information Paper No. 160. Ontario Forest Research Institute. Sault Ste. Marie, Ontario. pp. 88–93.
- South, D. B., S. W. Harris, J. P. Barnett, M. J. Hains and D. H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management* 204(2):385-398.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2009. SAS Ver. 9.2. SAS Inc., Cary, NC.
- Ter-Mikaelian, M. T. and W. C. Parker. 2000. Estimating biomass of white spruce seedlings with vertical photo imagery. *New Forests* 20: 145–162.

- Thompson, B. E. 1985. Seedling morphological evaluation. What you can tell by looking. In: Duryea M. L. (ed.). *Evaluating seedling quality: principles, procedures and predictive abilities of major test*. Forest Research Laboratory. Oregon State University. pp.: 59-71.
- Vallejo, V. R., A. Smanis, E. Chirino, D. Fuentes, A. Valdecantos and A. Vilagrosa. 2012. Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. *New Forests*. 43:561–579.
- Vilagrosa, A., P. Villar S. y J. Puértolas. 2006. El endurecimiento en vivero de especies forestales mediterráneas. En: Cortina J.; J. L. Peñuelas; J. Puértolas, R. Savé y A. Vilagrosa (eds). *Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos*. Ministerio de Medioambiente. España. pp. 119-140.
- Villar S., P.; L. Ocaña B., J. L. Peñuelas R. y I. Carrasco. 1997. Efecto de diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico en el contenido de nutrientes y la resistencia a la desecación de plántulas de *Pinus halepensis* Mill. *Actas del II Congreso Forestal Español*. Pamplona. pp.: 673-678.



Plántulas de Pinus pseudostrobus cultivadas en el Vivero Forestal del Bosque Escuela (UANL)
Foto: José A. Sigala Rodríguez
Septiembre de 2011

CAPÍTULO IV

4 SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO INICIAL DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN DOS CONDICIONES DE SITIO.

4.1 Resumen

Se evaluó el efecto del sistema de producción y el preacondicionamiento en la supervivencia y crecimiento de *P. pseudostrobus* plantado en dos condiciones de sitio. El análisis se hizo mediante curvas de supervivencia construidas por el método Kaplan-Meier, mientras que el crecimiento se comparó mediante un análisis de covarianza. Los resultados muestran diferencias significativas en la supervivencia entre los sistemas de producción, pero no entre los niveles de preacondicionamiento, aunque hubo una respuesta diferente en cada sistema de producción; además, se encontró efecto significativo debido a la condición del sitio de plantación. El diámetro de las plántulas fue la variable que influyó significativamente en la supervivencia de la plantación. El crecimiento en diámetro y la altura, estuvieron influenciados principalmente por la condición del sitio de plantación, aunque se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de producción, así como entre niveles de preacondicionamiento. No hubo influencia de los factores analizados en la producción de biomasa; sin embargo, se observó un efecto marginalmente significativo del sistema de producción.

4.2 Summary

The effects of stock-type and preconditioning on survival and growth of *P. pseudostrobus* planted in two different site conditions were evaluated. Survival was analyzed with Kaplan-Meier curves method, while growth for each treatment was compared through analysis of covariance. The results show significant differences in survival between stock-types but not between preconditioning levels, although there was a different response of each stock-type to preconditioning; also a significant effect of site conditions was found and root collar diameter had a significant influence on survival of some treatments. Growth in ground base line diameter and total height was influenced by site condition, also significant differences between stock-types were found as well as between preconditioning levels. There was not influence of analyzed factors on biomass production, however a marginal effect of stock-type was observed.

4.3 Introducción

El propósito primordial de cualquier lote de planta destinado a reforestación, es superar satisfactoriamente la fase de establecimiento (Navarro *et al.*, 2006); por ello, antes de efectuar una reforestación, es importante identificar los factores ambientales limitantes del área de plantación, de manera que la planta se cultive bajo el sistema de producción que proporcione los atributos necesarios para garantizar altas tasas de supervivencia en dicho sitio (Navarro *et al.*, 2006; Landis *et al.*, 2010); de ahí que la reforestación es a menudo la fase de mayor riesgo y costosa en el manejo forestal (Belli & Ek, 1988).

En la región sur de Nuevo León, uno de los factores limitantes es baja productividad del suelo, la cual limita el establecimiento adecuado de la regeneración, por lo que se requiere que las plántulas utilizadas para la reforestación tengan el suficiente volumen radicular que les permita una mayor capacidad para aprovechar la humedad y nutrimentos del suelo, ya que, los individuos recién establecidos, inicialmente dependen del sistema radicular, el cual que se relaciona directamente con el balance hídrico de la planta (Grossnickle, 2005). De esta manera, en sitios de difícil regeneración, el tipo y tamaño de contenedor puede influir en su supervivencia y crecimiento (South *et al.*, 2005),

Asimismo, en regiones donde se presentan sequías extremas, el preacondicionamiento de las plántulas mediante la restricción de humedad en el sustrato, es una práctica utilizada en viveros forestales para activar o acentuar los mecanismos de resistencia a situaciones de estrés (Villar *et al.*, 2000), ya que se reducen las tasas de crecimiento, se propicia la aparición de la yema apical y se incrementa la lignificación de tallo (Prieto *et al.*, 2007).

4.4 Objetivos e hipótesis

4.4.1 Objetivos

- i) Evaluar el efecto del sistema de producción y el preacondicionamiento en la supervivencia y crecimiento de plántulas de *P. pseudostrobus* establecidas en dos condiciones de sitio.
- ii) Identificar los factores de riesgo en la supervivencia de la reforestación.
- iii) Determinar cuáles son las variables morfológicas que tienen mayor influencia en la supervivencia y crecimiento durante los primeros 14 meses después de establecer la plantación.
- iv) Cuantificar la producción de biomasa aérea y radical en las plántulas establecidas.

4.4.2 Hipótesis nula

- i) No existe un efecto significativo del sistema de producción y el preacondicionamiento en la supervivencia y crecimiento de *Pinus pseudostrobus* a 14 de establecimiento.
- ii) El sistema de producción, el preacondicionamiento, la condición del sitio de plantación no son factores de riesgo para la supervivencia de una reforestación de *P. pseudostrobus*.
- iii) Las variables morfológicas de la planta no tienen influencia en la supervivencia y crecimiento de *P. pseudostrobus* durante los primeros 14 meses de establecimiento.
- iv) Los factores sistema de producción, preacondicionamiento y condición del sitio no influyen significativamente en la producción de biomasa en plántulas de *P. pseudostrobus* a 14 meses de establecimiento.

4.5 Metodología

4.5.1 Variables analizadas

Se utilizó la información de supervivencia en campo (1, 0), asimismo se utilizaron los datos de altura del tallo (cm), diámetro a la base del suelo (mm), peso seco de la parte aérea (PSA) y peso seco de la raíz (PSR) (g) de cada medición (ver Capítulo II), para incluirlas como covariables en el análisis de supervivencia de la plantación.

Las variables PSA y PSR se calcularon mediante las ecuaciones alométricas descritas en el Capítulo III. Para seleccionar la ecuación adecuada en la estimación de biomasa (PSA y PSR) en función de las variables D, H o D^2H , se consideraron los estadísticos de bondad de ajuste R^2 y error estándar (SE), así como el error relativo de predicción (ERP). En el Cuadro 4.1 se muestran los parámetros de los modelos seleccionados.

Cuadro 4.1. Valores de los parámetros para calcular biomasa en plántulas de *Pinus pseudostrobus* por cada sistema de producción.

Ecuación*	Sistema	Parámetros			n	SE	R^2	ERP (%)
		β_0	β_1	β_2				
$PSAi = \beta_0(D^2Hi)^{\beta_1}$	Cs[1+0]	0.715	0.739	--	123	0.195	0.97	10.29
	Bs[2+0]	0.908	0.755	--				
	Bf[1+1]	1.090	0.589	--				
$PSRi = \beta_0D_i^{\beta_1}H_i^{\beta_2}$	Cs[1+0]	0.044	1.661	0.020	123	0.258	0.92	-8.09
	Bs[2+0]	0.044	1.067	0.488				
	Bf[1+1]	0.127	1.753	-0.361				

*De acuerdo al modelo $W = \beta_0X^{\beta_1}$, ver Capítulo III. PSA=Peso seco de la parte aérea (g), PSR= Peso seco de la raíz (g), D= Diámetro al cuello (mm), H=Altura (cm). La variable D^2H está en unidades de cm^3 .

Con los datos de diámetro a la base del suelo y la altura del tallo obtenidos a los 14 meses de realizada la plantación, se calculó el incremento en diámetro, incremento en altura y la tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura mediante la siguiente relación:

$$TRC = \frac{\ln(X_2) - \ln(X_1)}{t_2 - t_1} \quad (4.1)$$

Donde: TRC = Tasa relativa de crecimiento en diámetro ($mm\ mm^{-1}$) o altura ($cm\ cm^{-1}$) en nueve meses; X_2 = valor de la variable respuesta al final del periodo de evaluación y X_1 = valor inicial de la variable, al momento de establecer la plantación; t_1 = fecha

de plantación y t_2 = fecha de evaluación final, la diferencia fue en meses (Cregg, 1994).

Asimismo, a los 14 meses de establecida la plantación, se extrajeron 36 plantas al azar para evaluar su producción de biomasa. Para esto sólo se consideraron los sistemas de producción en bolsa de polietileno (2+0 y 1+1) debido a que en el sistema de producción en charola (1+0) no se encontró muestra suficiente para todos los niveles de preacondicionamiento; se tomaron tres plantas al azar por tratamiento en cada sitio evaluado y se llevaron a laboratorio en donde se obtuvieron las características morfológicas y se introdujeron a una estufa de secado a 60 °C durante 27 horas, para determinar el peso seco tanto de la parte aérea (PSA) como de la raíz (PSR); con ello se calculó el incremento en biomasa y la tasa relativa de crecimiento (Ecuación 4.1).

4.5.2 Análisis estadístico

4.5.2.1 Supervivencia

Las diferencias de supervivencia entre los tratamientos se evaluaron por la prueba Log-Rank a partir de curvas de supervivencia construidas por el método Kaplan-Meier, para esto la función de supervivencia se define como:

$$S(t) = P(T \geq t) \quad (4.2)$$

donde: $S(t)$ es la probabilidad de que una muerte ocurra en un tiempo T al menos, tan grande como el tiempo t (Kaplan & Meier, 1958). Para este análisis se considera el estatus de cada planta (viva o muerta) al final del periodo de evaluación, así como el tiempo de vida de la misma. Este análisis se realizó con el procedimiento LIFETEST de SAS ver. 9.2 (2009).

Un segundo análisis fue una regresión de riesgos proporcionales de Cox, la cual permitió estimar el efecto del sitio de plantación, el sistema de producción y preacondicionamiento considerando las variables morfológicas de las plántulas (covariables), mismas que cambian con el tiempo. En un modelo de riesgos proporcionales, el riesgo de un individuo i a un tiempo t , o bien $h_i(t)$, es el producto la función de riesgo (h_0) de referencia no especificada y una función exponencial de

k covariables (Allison, 1995):

$$h_i(t) = h_0(t)e^{(\beta_1 t_{i1} + \dots + \beta_k t_{ik})} \quad (4.3)$$

El modelo de Cox se efectuó mediante el procedimiento PHREG de SAS ver. 9.2 (2009), mediante el cual se estima un coeficiente β para cada factor o covariable del modelo y prueba la hipótesis nula que $\beta = 0$ usando el estadístico Chi². Dicho coeficiente explica el efecto de un factor o una covariable en la función de riesgo, es decir, si el coeficiente β es negativo significa que el riesgo de muerte se reduce con el incremento de la covariable, mientras que un coeficiente β positivo indica lo contrario (Williams, 2008).

4.5.2.2 Crecimiento y producción de biomasa

Se realizó un análisis de covarianza (ANCOVA) de las variables altura final (cm), diámetro final (mm), incremento en altura (cm), incremento en diámetro (mm), así como la tasa relativa de crecimiento en diámetro (TRCD [$\text{mm mm}^{-1} \cdot \text{mes}^{-1}$]) y en altura (TRCD [$\text{mm mm}^{-1} \cdot \text{mes}^{-1}$]), así como biomasa acumulada, incremento en biomasa y TRC en biomasa [$\text{g g}^{-1} \cdot \text{mes}^{-1}$] tanto de la parte aérea como de la raíz. Este análisis se hizo con el procedimiento mixto (PROC MIXED) de SAS ver. 9.2 (2009) para determinar el efecto del sistema de producción y el nivel de preacondicionamiento como factores fijos y el sitio de plantación como efecto aleatorio, el modelo utilizado fue el siguiente:

$$\gamma_{ijk} = \mu + \tau_i + \eta_j + \delta_k + (\tau\eta_{ij}) + (\tau\delta_{ik}) + (\eta\delta_{jk}) + (\tau\eta\delta_{ijk}) + \varepsilon_{ij} \quad (4.4)$$

Donde: γ_{ijk} = Variable respuesta, μ = Efecto medio general, τ_i =Efecto atribuido al i -ésimo sitio de plantación, η_j =Efecto atribuido al j -ésimo sistema de producción, δ_k =Efecto atribuido al k -ésimo nivel de preacondicionamiento, ε_{ij} =Término de error aleatorio; las combinaciones de las letras representan las interacciones entre el nivel de preacondicionamiento y sistema de producción. El experimento se consideró como desbalanceado debido a que algunos tratamientos tuvieron menos de tres plántulas vivas al final del periodo de evaluación, por lo que se excluyeron de análisis.

En el análisis de covarianza se incluyeron las variables diámetro inicial (mm) y altura inicial (cm) como covariables para analizar su efecto o relación con las variables respuesta. Previo al análisis se evaluó el supuesto de normalidad de los datos, y en aquellas variables que no se cumplió, se procedió a la transformación de los datos mediante logaritmos neperianos.

4.6 Resultados y discusión

4.6.1 Supervivencia

A 14 meses (440 días) después de establecer la plantación, se obtuvo una supervivencia general de 52.9%, observándose una mayor mortalidad durante los primeros 97 días (31.2%). Los resultados muestran que el sitio de plantación presenta un efecto significativo en la supervivencia de *P. pseudostrobus* ($\text{Chi}^2=6.03$, $p=0.014$), con mayor supervivencia (60.2%) en el Sitio 2, con exposición SO y pendiente fuerte; en cambio, en el Sitio 1 se presentó una supervivencia apenas del 45.4%.

La supervivencia de una planta en determinado sitio, puede ser afectada por las propiedades físico-químicas del suelo, como humedad, temperatura, pH, conductividad eléctrica y contenido de nutrientes (Omary, 2011), aunado al método utilizado para establecer la planta en el sitio definitivo (Ortega *et al.*, 2006); sin embargo, en este ensayo, los sitios presentan propiedades edáficas similares (Cuadro 2.2); por ello, las diferencias de supervivencia de las plántulas entre sitios de plantación pudieron ser el resultado de las diferencias en las condiciones topográficas como pendiente, exposición y elevación (Chen & Klinka, 1998).

La prueba Log-Rank mostró diferencias altamente significativas entre los tres sistemas de producción evaluados, tanto en el Sitio 1 ($\text{Chi}^2=129.5$, $p<0.0001$) como en el Sitio 2 ($\text{Chi}^2=154.70$, $p<0.0001$) con una mayor supervivencia en las plantas en el sistema 1+1 (Sitio 1=66.7%; Sitio 2=90.3%), seguidas de aquellas que fueron cultivadas en bolsa de polietileno (2+0) (Sitio 1=63.8%; Sitio 2=79.2%) y con menor supervivencia aquellas que se produjeron en charola de poliestireno (1+0) (Sitio

1=6.9%; Sitio 2=11.1%); no obstante, entre los sistemas 1+1 y 2+0 no hubo diferencias significativas (Cuadro 4.2, Figura 4.1).

Cuadro 4.2. Supervivencia estimada por tratamiento en cada sitio de plantación, de acuerdo al método Kaplan-Meier.

Trat**	Sitio 1				Sitio 2			
	Periodo de supervivencia (Días)*			Superv. Final (%)	Periodo de supervivencia (Días)			Superv. Final (%)
	75%	50%	25%		75%	50%	25%	
Cs[1+0]-B	71	97	126	12.5	71	71	157	16.7
Cs[1+0]-M	71	97	111	4.2	71	97	203	16.7
Cs[1+0]-A	71	71	71	4.2	71	97	97	0.0
Bs[2+0]-B	217	--	--	68.2	--	--	--	79.2
Bs[2+0]-M	97	440	--	39.1	97	--	--	66.7
Bs[2+0]-A	--	--	--	83.3	--	--	--	91.7
Bt[1+1]-B	440	--	--	66.7	--	--	--	87.5
Bt[1+1]-M	217	--	--	58.3	--	--	--	91.7
Bt[1+1]-A	--	--	--	75.0	--	--	--	91.7

*Días transcurridos a partir de la plantación en los que se presentó una supervivencia igual o menor a 75, 50 y 25%. **Tratamientos: Sistema de producción: (Cs [1+0]= siembra en charola, Bs [2+0]= siembra en bolsa, Bt [1+1]= siembra en charola y trasplante a bolsa); Preacondicionamiento: (B= nivel bajo, M= nivel moderado, A= nivel alto).

Resultados similares se han encontrado para *P. pseudostrobus* en el estado de Nuevo León, con mejores resultados en las plantas cultivadas en bolsa de polietileno (Marroquín *et al.*, 2006; Castillo, 2001). La respuesta favorable del sistema convencional en bolsa se puede explicar debido a que los envases de mayor volumen proveen mejores características del sistema radicular como el volumen y conductancia hidráulica, que le permiten aprovechar mejor la humedad en el suelo (Chirino *et al.*, 2009); mayormente en regiones con escasa precipitación pluvial y condiciones edáficas pobres como las que presenta el área de estudio.

Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas entre los niveles de preacondicionamiento, tanto en el Sitio 1 ($\chi^2=4.16$, $p=0.128$) como en el Sitio 2 ($\chi^2=0.23$, $p=0.893$); sin embargo, al analizar la combinación del sistema de producción con los tres niveles de preacondicionamiento, se encontró una mayor supervivencia en las plántulas producidas en el sistema 2+0 con un nivel de preacondicionamiento alto, en ambos sitios (Sitio 1=83.3%; Sitio 2=91.7%); aunque en el Sitio 2, este tratamiento no fue estadísticamente diferente a los otros niveles de

preacondicionamiento, incluso presentó la misma supervivencia que el sistema de producción 1+1 con nivel moderado y alto; en cambio, en el Sitio 1, la supervivencia de las plantas cultivadas bajo el sistema 2+0 fue estadísticamente diferente entre el nivel de preacondicionamiento alto y moderado ($\text{Chi}^2=5.92$, $p=0.015$). Si bien, en el sistema de producción en charola 1+0, el preacondicionamiento no presentó efecto significativo, se observó menor supervivencia en aquellas plantas sometidas a un nivel alto para ambos sitios de plantación (Figura 4.1).

El preacondicionamiento en vivero mediante la modificación de ciclos de riego, depende entonces del tamaño del envase en el que se produce la planta, ya que las plántulas cultivadas en contenedores pequeños tienen un desarrollo de raíz limitado, lo que las hace más vulnerables a estrés hídrico y con ello una disminución la conductancia estomática aumentando el riesgo de morir durante el primer periodo de sequía (González *et al.*, 2011); por ello, en este ensayo las plántulas cultivadas en charola (1+0) y sometidas a un estrés hídrico elevado, presentaron menor supervivencia; en cambio, este mismo nivel de preacondicionamiento aplicado en el sistema de producción en bolsa (2+0 y 1+1) presentó mejores resultados, principalmente en el Sitio 2.

Otros estudios mencionan que el estrés hídrico presenta un efecto negativo en los procesos fisiológicos como la alteración del estatus de carbohidratos y asimilación de CO_2 , lo que influye en un mayor estrés de trasplante (Guehl *et al.*, 1993; Ortega *et al.*, 2002). De esta manera, la aplicación controlada de estrés hídrico puede influenciar en variables relacionadas con mecanismos de evitación de la sequía como el cierre de estomas o disminución de la conductancia estomática, pero no influye en los mecanismos de tolerancia a la sequía como el ajuste osmótico o cambios en las propiedades de las membranas celulares (Villar *et al.*, 2000; Valladares *et al.*, 2004).

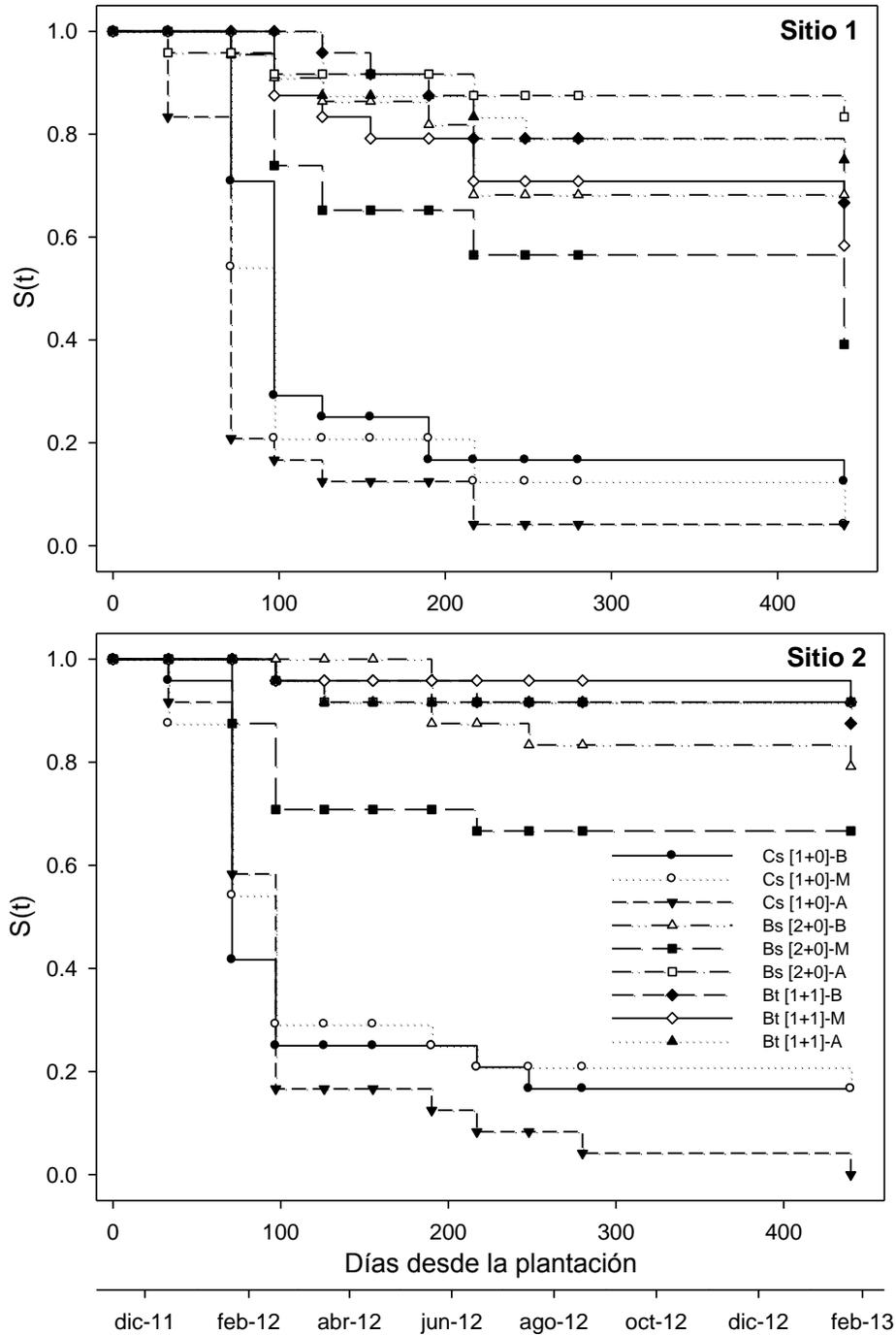


Figura 4.1. Función de supervivencia estimada [S(t)] para los diferentes tratamientos evaluados en la reforestación con *P. pseudostrobus*, en dos sitios de plantación.

4.6.1.1 Análisis de riesgos

El modelo de riesgos proporcionales de Cox fue significativo para el conjunto de datos analizados ($\text{Chi}^2=254.1$, $p>0.0001$), de manera que se rechazó la hipótesis nula global de que $\beta = 0$ (Ecuación 4.3). Los resultados muestran que entre los factores analizados, el sitio de plantación presentó un efecto significativo en la función de riesgo con un estimador β positivo en la comparación del Sitio 1 contra el Sitio 2, en otras palabras, establecer una planta bajo las condiciones del Sitio 1, tendrá un mayor riesgo de muerte comparada con aquella que se establezca bajo las condiciones del Sitio 2. Asimismo, el nivel medio de preacondicionamiento presentó un riesgo positivo significativo comparado con el nivel bajo (Cuadro 4.3).

Por otra parte, el análisis mostró un efecto altamente significativo de la covariable diámetro a la base del suelo, con signo negativo en el estimador y una relación de riesgo de 0.332, lo que significa que el incremento de 1 mm en el diámetro de la planta reduce el riesgo de muerte hasta en un 66.8% (es decir, $100(1 - e^{-1.102})$), siempre y cuando se mantuviesen constantes las otras variables. Esto se puede explicar, debido a que el diámetro está directamente relacionado con las reservas de carbohidratos no estructurales (Guehl *et al.*, 1993), y con el desarrollo de las raíces (Mason *et al.*, 2001); así las plántulas con los menores diámetros, pueden tener un pobre desempeño en campo, comparadas con aquellas de mayor diámetro y además con un adecuado manejo durante la plantación (Mason *et al.*, 2001).

Otra variable que influyó significativamente en la supervivencia, fue la altura del tallo, que contrariamente al efecto del diámetro, ésta presentó un estimador con signo positivo, aunque con una relación de riesgo baja (1.071), indicando que el aumento de 1 cm de altura aumentaría el riesgo de muerte en un 7.1% durante los primeros meses después de establecer la plantación.

Cuadro 4.3. Resultados de la regresión de riesgos proporcionales para la supervivencia de *P. pseudostrobus*.

Parámetro		GL	Estimador	SE	Chi ²	Pr> Chi ²	Razón de riesgo
Sitio de plantación	1	1	0.413	0.145	8.109	0.004	1.512
Sistema de producción	<i>Bs[2+0]</i>	1	-0.818	0.524	2.439	0.118	0.441
	<i>Bt[1+1]</i>	1	-0.173	0.355	0.236	0.627	0.841
Preacondicionamiento	<i>Alto</i>	1	0.145	0.182	0.633	0.427	1.156
	<i>Medio</i>	1	0.350	0.173	4.065	0.044	1.419
Diámetro (mm)		1	-1.102	0.259	18.088	<0.0001	0.332
Altura (cm)		1	0.069	0.034	4.182	0.041	1.071
Peso seco aéreo (g)		1	-0.179	0.289	0.382	0.537	0.836
Peso seco de raíz (g)		1	1.050	1.405	0.558	0.455	2.857

4.6.2 Desarrollo inicial

4.6.2.1 Crecimiento en diámetro y altura

El análisis de varianza mostró una influencia significativa ($p=0.01$) debido al sistema de producción sobre en diámetro total al final del periodo de evaluación, aunque el efecto de esta variable se explica mayormente por el diámetro inicial ($p<0.0001$); asimismo la altura de la planta al momento de establecer la plantación tuvo una relación altamente significativa con la altura final; pero, a su vez el preacondicionamiento presentó un efecto significativo sobre esta variable ($p=0.036$) (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Valores de F y Pr>F del ANCOVA para variables de crecimiento de plántulas de *Pinus pseudostrobus* a 14 meses de establecimiento en campo (Test de tipo III).

Fuente	Diámetro	Altura	ID	IH	TRCD	TRCH
Sitio	3.34(0.213)	5.36(0.195)	7.08(0.008)	8.87(0.003)	7.19(0.008)	8.54(0.004)
Sistema Prod.	4.69(0.010)	5.00(0.066)	4.23(0.016)	5.38(0.005)	4.09(0.018)	5.23(0.006)
Preacond.	2.16(0.306)	3.37(0.036)	3.50(0.032)	3.29(0.039)	3.46(0.033)	3.20(0.043)
Sistema*Preac.	2.30(0.078)	0.43(0.734)	1.25(0.294)	1.43(0.234)	1.14(0.333)	1.48(0.221)
Diámetro inicial	223.5(<0.0001)	6.30(0.013)	0.00(0.968)	3.13(0.078)	9.01(0.003)	2.96(0.087)
Altura inicial	0.48(0.491)	776.9(<0.0001)	0.80(0.371)	0.17(0.679)	0.82(0.367)	2.90(0.090)

Valores resaltados en negritas indican efecto significativo a una probabilidad $\alpha \leq 0.05$. ID=Incremento en diámetro; IH=Incremento en altura; TRCD=Tasa relativa de crecimiento en diámetro; TRCH=Tasa relativa de crecimiento en altura.

Por otra parte, el incremento y la tasa relativa de crecimiento tanto en diámetro como en altura, estuvieron influenciados significativamente, en orden de importancia,

por: el sitio de plantación, el sistema de producción y el preacondicionamiento, aunque la tasa relativa de crecimiento en diámetro (TCRD) fue afectada en mayor proporción por el diámetro inicial ($p=0.003$); asimismo, las variables altura y diámetro iniciales, tuvieron una influencia marginalmente significativa ($p<0.10$) sobre la tasa relativa de crecimiento en altura (TRCH) (Cuadro 4.4).

En general, se observó mayor crecimiento en las plántulas establecidas en el Sitio 1 con pendiente del 10% y exposición Noreste (Figura 4.2); estos resultados coinciden con los obtenidos por Omary (2011) en plantaciones de *Pinus halepensis*, quien encontró mayor crecimiento en sitios con exposición Este y en pendiente moderada. También, Ortega *et al.* (2006) encontraron que el sitio de plantación tuvo un efecto significativo en el crecimiento de plántulas de *Pinus radiata*, inclusive mayor que el efecto del tipo de contenedor, tal como lo observado en este estudio.

Los brinzales trasplantados a bolsa de polietileno (1+1), tuvieron un mejor desempeño en campo, principalmente con mayor tasa de crecimiento en altura, aunque las plántulas sembradas en charola presentaron mayor tasa relativa de crecimiento en diámetro (Figura 4.2). Al respecto Rose & Haase (2005) mencionan que las prácticas de cultivo en cada sistema de producción (raíz desnuda y contenedor), es el factor que mayormente influye en el comportamiento inmediato después de establecida la plantación, particularmente en regiones de baja calidad de sitio. Estas diferencias son quizá por el efecto acumulado de las variables morfológicas iniciales adquiridas por los individuos en la fase de cultivo en vivero; así, se asume que una vez que la planta se ha arraigado, la diferenciación del crecimiento dependerá principalmente de la variación del microambiente en el sitio de plantación (Pinto *et al.*, 2011).

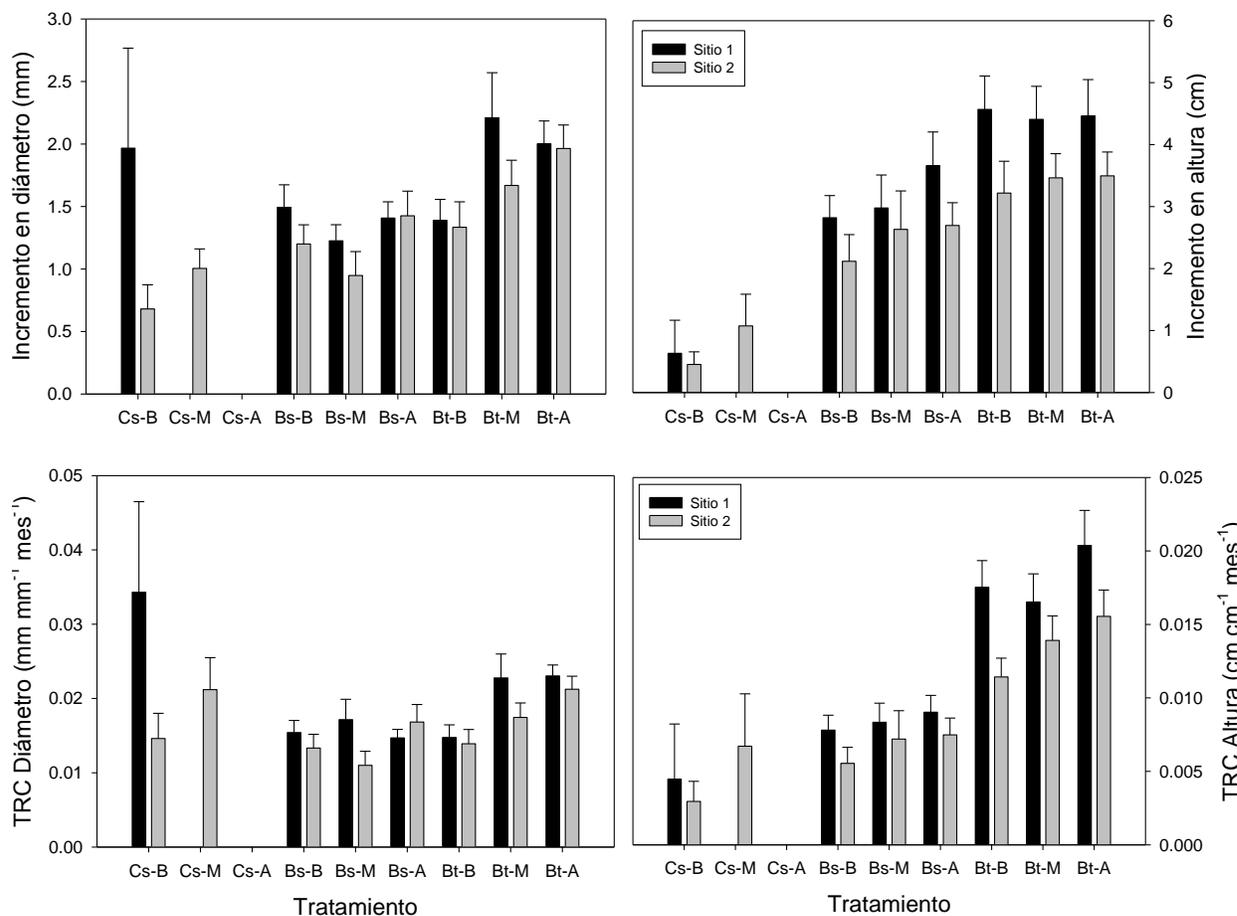


Figura 4.2. Incremento y tasa relativa de crecimiento en diámetro y altura de *Pinus pseudostrabus* en 14 meses de establecimiento en campo.

Por otra parte, las plántulas producidas en bolsa de polietileno (2+0 y 1+1) y sometidas a un nivel de preacondicionamiento alto, tuvieron mayor crecimiento; esta respuesta fue más notoria bajo las condiciones del Sitio 2 (pendiente fuerte y exposición Suroeste); aunque, este mismo nivel preacondicionamiento causó la mayor mortalidad de los individuos cultivados en charola (1+0), las cuales tuvieron mejor respuesta con el nivel bajo (Figura 4.2). Esta respuesta diferente en cada sistema de producción da la idea de que existe una interacción significativa sistema de producción x preacondicionamiento, sin embargo el análisis de varianza no mostró tal efecto, excepto en el diámetro final en cual se observa un efecto marginalmente significativo ($p=0.078$) (Cuadro 4.4), lo que hace suponer que el análisis se vio afectado por la carencia de datos en el tratamiento Cs [1-0]-A.

En este sentido, resultados encontrados por Rose *et al.* (1993) muestran que la interacción sistema de producción x estrés hídrico fue significativa en el crecimiento relativo de diámetro y peso fresco de *Pseudotsuga menziesii*. En contraparte, Villar *et al.* (2000) mencionan que el estrés hídrico no maximiza el desarrollo campo, a pesar de que el preacondicionamiento en vivero favorece el desarrollo equilibrado de la morfología de las plántulas; igualmente, Ortega *et al.* (2002) encontraron que el estrés hídrico (-1.23, -2.53 MPa) inducido en vivero, produjo una disminución en la tasa de crecimiento de *Pinus greggii* en campo. Por su parte, Royo *et al.* (2001) indican que la aplicación del preacondicionamiento combinado con la fertilización en vivero, puede contribuir a las diferencias del desempeño en campo.

4.6.2.2 Producción de biomasa

En todas las variables de producción biomasa, no se encontró un efecto significativo de los factores estudiados, no obstante en las variables de tasa relativa de crecimiento de biomasa aérea, incremento de biomasa de la raíz y TRC de biomasa de la raíz, se obtuvo un efecto marginalmente significativo ($p < 0.10$) del sistema de producción. También, la covariable diámetro inicial, presentó una influencia en el incremento de biomasa tanto de la parte aérea como de la raíz (Cuadro 4.5).

Cuadro 4.5. Valores de F y $Pr > F$ del ANCOVA para variables de producción de biomasa en plántulas de *Pinus pseudostrobus* a 14 meses de establecimiento en campo (Test de tipo III).

Fuente	Biomasa parte aérea			Biomasa de raíz		
	Acumulado	Incremento	TRC	Acumulado	Incremento	TRC
Sitio	0.13(0.728)	1.52(0.260)	0.11(0.746)	1.62(0.248)	0.15(0.730)	1.17(0.320)
Sistema	2.33(0.148)	1.25(0.283)	3.14(0.097)	2.22(0.159)	4.51(0.066)	4.08(0.066)
Preacond.	1.67(0.277)	0.88(0.469)	1.51(0.305)	0.74(0.524)	0.86(0.535)	0.55(0.610)
Sistema*Preac.	1.07(0.405)	0.25(0.787)	0.77(0.508)	0.20(0.827)	1.19(0.409)	0.19(0.834)
Diámetro inicial	1.62(0.214)	3.39(0.077)	0.12(0.727)	0.49(0.490)	5.95(0.022)	0.98(0.332)
Altura inicial	4.04(0.055)	0.98(0.332)	0.51(0.483)	0.45(0.507)	0.04(0.841)	0.16(0.695)

Valores resaltados en negritas indican efecto significativo a una probabilidad $\alpha \leq 0.05$. TRC=Tasa relativa de crecimiento.

En general la biomasa total acumulada fue similar en los dos sistemas de producción, aunque se observaron valores ligeramente mayores en las plantas

cultivadas en el sistema 1+1 establecidas en el Sitio 1. En la Figura 4.3, se muestra también que la relación PSA/PSR es similar en todos los tratamientos; en contraparte, en un estudio con *Picea mariana*, Thiffault *et al.* (2012), a pesar que no hallaron algún efecto del sistema de producción en biomasa total al año de plantado, se detectaron diferencias significativas en la relación PSA/PSR entre plantas producidas a raíz desnuda y contendedor.

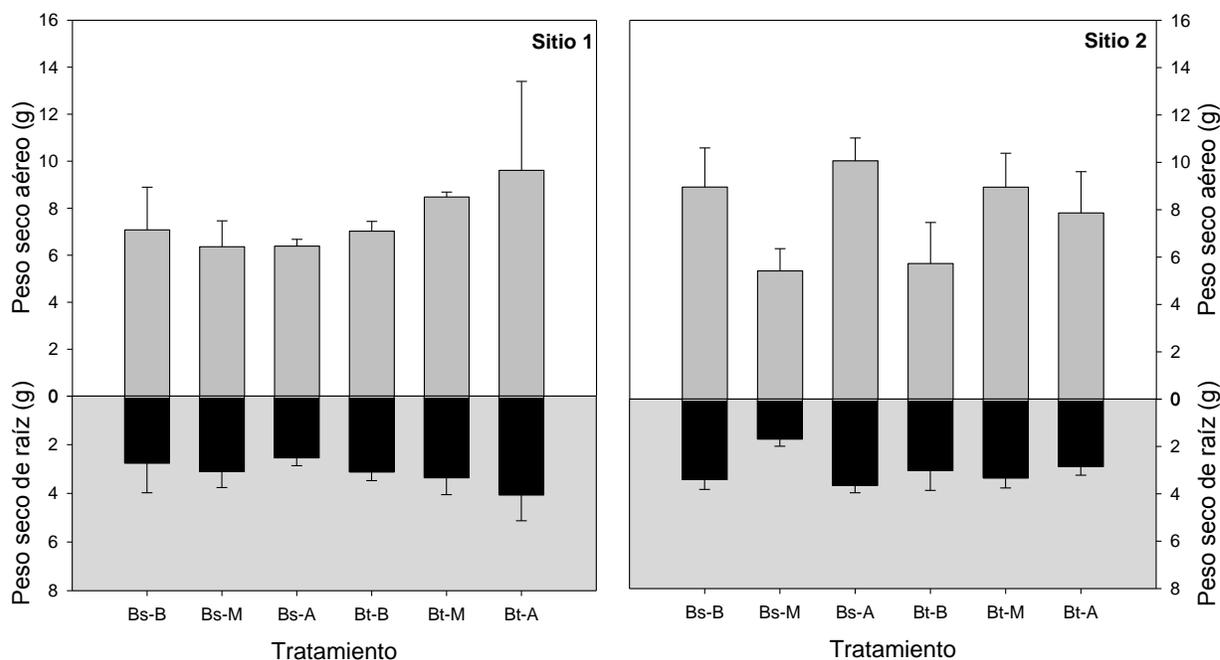


Figura 4.3. Biomasa acumulada en cada tratamiento para las dos condiciones de sitio a 14 meses después de plantado.

En ambos sitios de plantación se observaron mejores tasas de producción de biomasa en las plántulas cultivadas en el sistema 1+1 (Figura 4.4), a pesar que éstas tenían valores significativamente menores que las plántulas producidas en el sistema 2+0 (Cuadro 3.2). En este sentido, los patrones de crecimiento de las plántulas sugiere que diferencias morfológicas entre los sistemas de producción, tienden a desaparecer en subsecuentes épocas de crecimiento después de plantara (Rose & Haase, 2005).

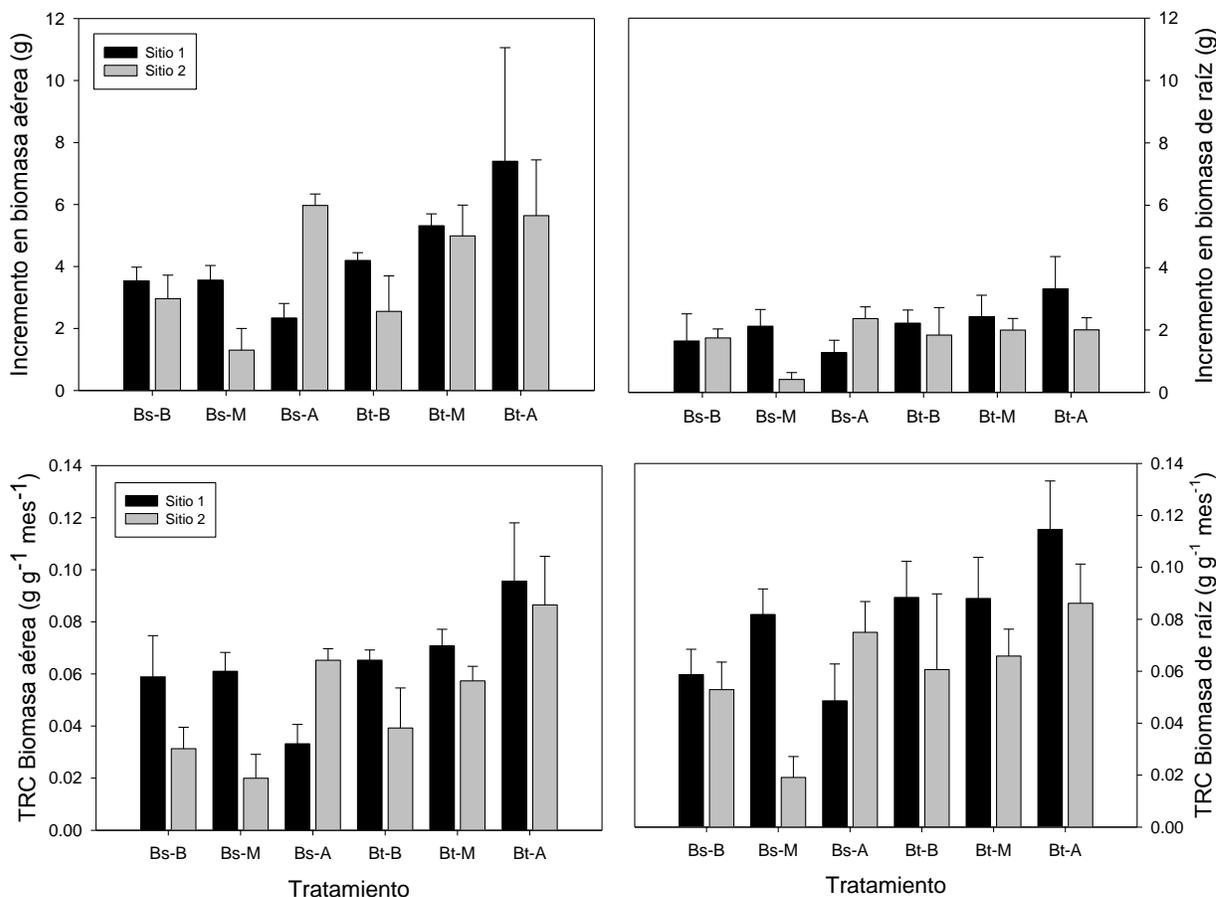


Figura 4.4. Incremento y tasa relativa de producción en biomasa (aérea y raíz) de *Pinus pseudostrobus* a 14 meses después de plantado.

4.7 Conclusiones

El sistema de producción en vivero influyó en la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* durante los primeros meses después de plantado. A pesar que el preacondicionamiento no tiene algún efecto en la supervivencia, esta práctica se puede recomendar cuando las plántulas sean de mayor talla para acentuar mecanismos de evitación de la sequía como la reducción de tasas de transpiración o conductancia estomática.

En sitios de baja productividad, es importante considerar las condiciones topográficas del terreno, ya que éstas influyen en la alteración del microambiente para que la planta sobreviva.

El diámetro en las plántulas de *Pinus pseudostrobus*, es la variable morfológica que mayormente se relaciona con el riesgo de mortalidad. Por ello, en la producción de planta en vivero, se debe elegir el sistema de producción que provea mejor robustez para asegurar un éxito de las reforestaciones en el área de estudio.

Las tasas de crecimiento dependen, en buena medida, de las condiciones ambientales del sitio de plantación; sin embargo, se recomienda utilizar sistemas de producción con envases de mayor volumen que permitan el desarrollo adecuado de la raíz y con una mejor capacidad de aprovechar la humedad y nutrientes disponibles en el suelo.

4.8 Referencias

- Allison P. D. 1995. Survival analysis using the SAS system: a practical guide. SAS Institute, Cary, NC.
- Belli, K. L. and Ek, A. R. 1988. Growth and survival modeling for planted conifer in the Great Lakes Region. *Forest Science* 34(2):458-473
- Castillo M., C. 2001. Influencia de la calidad de *Pinus pseudostrobus* en supervivencia y crecimiento de un ensayo de reforestación en Iturbide, N.L. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Forestales-UANL. 56 p.
- Chen H., Y. H. and K. Klinka. 1998. Survival, growth, and allometry of planted *Larix occidentalis* seedlings in relation to light availability. *Forest Ecology and Management* 106:169-179.
- Chirino, E., A. Vilagrosa, J. Cortina, A. Valdecantos, D. Fuentes, R. Trubat, V.C. Luis, J. Puértolas, S. Bautista, M.J. Baeza, J.L. Peñuelas and V. R. Vallejo. 2009. Ecological restoration in degraded drylands: the need to improve the seedling quality and site conditions in the field. In: Grossberg S. P. (Ed). *Forest Management*. Nova Science Publishers, Inc.
- González R., V. R. M. Navarro C. and R. Villar. 2011. Artificial regeneration with *Quercus ilex* L. and *Quercus suber* L. by direct seeding and planting in southern Spain. *Annals of Forest Science* 68:637–646.
- Grossnickle, S. C. 2005. Importance of root growth in overcoming planting stress. *New Forests* 30:273–294.
- Guehl, J. M., A. Clement, P. Kaushal and G. Aussenac. 1993. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings. *Tree Physiology* 12: 173-183.

- Kaplan, E. L. and P. Meier. 1958. Nonparametric estimation from incomplete observations. *Journal of the American Statistical Association*. 53(282):457-481.
- Landis, T. D.; R. K. Dumroese and D. L. Haase. 2010. The container tree nursery manual. Volume 7. Seedling processing, storage, and outplanting. Agric. Handbook 674. Department of Agriculture. Forest Service. Washington, DC., U.S. 200 p.
- Marroquín F., R. A.; J. Jiménez P.; F. Garza O.; O. Aguirre C.; E. Estrada C. y R. Bourguet D. 2006. Pruebas de regeneración artificial de *Pinus pseudostrobus* en localidades degradadas por incendios. *Revista Ciencia UANL* 6(3):298-303.
- Mason, E. G. 2001. A model of the juvenile growth and survival of *Pinus radiata* D. Don. Adding the effects of initial seedling diameter and plant handling. *New Forests* 22: 133–158.
- Navarro, R. M.; A. del Campo y J. Cortina. 2006. Factores que afectan al éxito de una repoblación y su relación con la calidad de la planta. *En: Cortina, J.; J. L. Peñuelas; J. Puértolas, R. Savé y A. Vilagrosa (eds.). Calidad de planta forestal para la restauración en ambientes mediterráneos. Estado actual de conocimientos.* Ministerio de Medioambiente. España. pp. 31-46.
- Omary, A. A. 2011. Effects of aspect and slope position on growth and nutritional status of planted Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in a degraded land semi-arid areas of Jordan. *New Forests* 42:285–300.
- Ortega D., M. L.; V. A. González H.; V. M. Cetina A.; A. Villegas M. y J. Vargas H. 2002. Supervivencia y crecimiento en campo de *Pinus greggii* Engelm. previamente sometido a podas o sequía en vivero. *Agrociencia*. 36(2):233-241.
- Ortega, U.; J. Majada; A. Mena P.; J. Sanchez Z.; N. Rodriguez I.; K. Txarterina; J. Azpitarte and M. Duñabeitia. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests* 31:97–112.
- Prieto R., J. A., P. A. Domínguez C., E. H. Cornejo O. y J. J. Nívar Ch. 2007. Efecto del envase y del riego en vivero en el establecimiento de *Pinus cooperi* Blanco en dos condiciones de sitio. *Madera y Bosques*. 13(1): 79-97.
- Rose, R. and D. L. Haase. 2005. Root and shoot allometry of bareroot and container Douglas-fir seedlings. *New Forests* 30:215–233
- Royo, A., L. Gil and J. A. Pardos. 2001. Effect of water stress conditioning on morphology, physiology and field performance of *Pinus halepensis* Mill. seedlings. *New Forests* 21: 127–140.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2009. SAS Ver. 9.2. SAS Inc., Cary, NC.
- Thiffault, N., Hébert, F. & Jobidon, R. 2012. Planted *Picea mariana* growth and nutrition as influenced by silviculture x nursery interactions on an ericaceous-dominated site. *Silva Fennica* 46(5): 667–682
- Valladares F., A. Vilagrosa, J. Peñuelas, R. Ogaya, J. J. Camarero, L. Corcuera, S. Sisó y E. Gil-Pelegrín. 2004. Estrés hídrico: ecofisiología y escalas de la sequía. *En:*

Valladares, F. (ed.). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. Pp.: 163-190.

Villar, S. P.; J. L. Peñuelas R. e I. Carrasco M. 2000. Influencia del endurecimiento por estrés hídrico y la fertilización en algunos parámetros funcionales relacionados con la calidad de la planta de *Pinus pinea*. *Actas del 1er Simposio sobre el pino piñonero*. Valladolid. Volumen 1: 211-218.

Williams, C. S. 2008 Surviving Survival Analysis. An Applied Introduction. In: SESUG 2008: The Proceedings of the South East SAS Users Group, St Pete Beach, FL. On line: <http://analytics.ncsu.edu/sesug/2008/ST-147.pdf>.



Condición del sitio de plantación, Galeana, Nuevo León.
Foto: José A. Sigala R.
Agosto de 2012

CAPÍTULO V

5 PREDICCIÓN DE LA SUPERVIVENCIA Y CRECIMIENTO DE *Pinus pseudostrobus* Lindl. EN FUNCIÓN DE LAS VARIABLES MORFOLÓGICAS INICIALES

5.1 Resumen

Mediante la medición de las variables morfológicas, se analizó su la capacidad de predecir la supervivencia y crecimiento de *P. pseudostrobus* a 14 meses de plantado. La supervivencia se analizó mediante un modelo de regresión logística y se estimó el grado de correlación de las variables morfológicas iniciales con las variables de crecimiento al final del periodo de estudio; además, se utilizaron modelos de regresión lineal múltiple para determinar si dos o más variables pueden predecir en mayor proporción el crecimiento de las plántulas. Los resultados muestran que el diámetro al cuello de la raíz tiene una influencia altamente significativa en la probabilidad de supervivencia, y los estadísticos de ajuste de los modelos en ambas condiciones de plantación, indican que dicha variable tiene una buena capacidad predictiva de la supervivencia. El diámetro y la altura inicial tuvieron mayor correlación con el diámetro y la altura al final del periodo de evaluación, respectivamente. Las regresiones múltiples muestran que el diámetro al cuello, peso seco de la raíz y altura del tallo, explican en mayor proporción la variación de altura y diámetro en campo, mientras que el peso seco aéreo predice las variables de producción de biomasa; sin embargo, los coeficientes de determinación fueron bajos.

5.2 Summary

The aim was to analyze if morphological variables has ability to predict survival and growth of *P. pseudostrobus* at 14 months after planting. Survival was analyzed through a logistic regression model and correlation coefficients between morphological variables at planting and growth variables at the end of evaluation period were computed; also multiple linear regression techniques were used to test if two or more variables had the capacity to explain most of variation of seedling growth. Results show that root collar diameter (RCD) influences highly on survival probability; goodness-fit statistics of models in both site conditions suggest that RCD had good ability to predict survival. RCD, root dry weight and soot height explain most of variation of height and diameter at 14 months after planting, whereas shoot dry weight predicts biomass production variables however with poor determination coefficients.

5.3 Introducción

Las variables morfológicas y de distribución de biomasa constituyen una herramienta útil para evaluar la calidad de la planta en un vivero, ya que son los indicadores más importantes para la selección de plántulas tolerantes a la sequía (Thompson, 1985; Cregg, 1994), y con ellas es posible pronosticar si una planta sobrevivirá y crecerá adecuadamente bajo determinadas condiciones de plantación (Rowan, 1987; South, 2000). La principal ventaja de estas variables, es que son fácilmente medibles y se determinan mediante muestreos de bajo costo.

Para algunas especies de coníferas, el diámetro al cuello de la raíz es la variable morfológica más relacionada con la supervivencia (South *et al.*, 2005; Dumroese *et al.*, 2009; Tsakalidimi *et al.*, 2013), con el incremento en volumen (Rose & Ketchum, 2003) y la capacidad de competencia con herbáceas (Noland *et al.*, 2001; Mason, 2001). Por otra parte, el crecimiento relativo de las plántulas está relacionado principalmente con condiciones ambientales del sitio y el sistema de producción en vivero (Rose & Haase, 2005; Ortega *et al.*, 2006; Pinto *et al.*, 2011), así como por la edad de las plántulas al momento de establecer la plantación (Li *et al.*, 2011).

De esta forma, las características de la planta objetivo, deben ser descritas por su desempeño en campo y no solamente en el vivero (Landis, 2011); por ello, para cada condición de sitio, dichos parámetros deben ser probados de manera que los resultados sirvan para mejorar las prácticas de cultivo en vivero y así, redefinir el concepto de calidad de planta para la región de estudio.

5.4 Objetivos e hipótesis

5.4.1 Objetivos

- i) Determinar la probabilidad de supervivencia de *P. pseudostrobus* en función de las variables morfológicas iniciales.
- ii) Estimar la relación lineal entre las variables morfológicas iniciales y las variables de crecimiento a 14 meses de establecer la plantación.

5.4.2 Hipótesis nula

- i) Las variables morfológicas de la planta al momento de realizar la plantación, no permiten predecir la supervivencia a 14 meses de establecimiento.
- ii) No existe relación significativa entre las variables morfológicas iniciales de *P. pseudostrobus* y las variables de crecimiento en campo.

5.5 Metodología

5.5.1 Variables analizadas

Se utilizaron las variables obtenidas al momento de establecer la plantación: altura del tallo (cm) y diámetro al cuello (mm) para cada plántula; asimismo, se consideró el peso seco (g) de la parte aérea (PSA) y de la raíz (PSR), calculados mediante ecuaciones alométricas (Cuadro 4.1), las cuales fueron usadas como variables explicativas de la supervivencia, crecimiento y producción de biomasa a los 14 meses de plantado.

5.5.2 Análisis estadístico

Para el análisis de supervivencia se utilizó el procedimiento LOGISTIC de SAS 9.2 (2009), con el cual, mediante el modelo de regresión logística, se determinó la probabilidad de supervivencia (variable respuesta) en función de los tratamientos y/o las variables morfológicas iniciales (altura, diámetro, PSA y PSR) como variables explicativas:

$$P = \frac{1}{1+e^{-(a+bX)}} \quad (5.1)$$

Donde: P = Probabilidad de supervivencia; e = base de los logaritmos naturales (2.7182); a, b = parámetros del modelo; X = variable independiente (Hosmer & Lemeshow, 2000).

Se usó el método selección por pasos hacia atrás (Backward selection) de las variables independientes, de tal forma que las variables no significativas fueron retiradas dejando sólo las significativas a una probabilidad de 95% ($p \leq 0.05$). El estadístico de la prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow se basa en la hipótesis nula de que las diferencias entre las probabilidades estimadas y las observadas no son significativas, de manera que valores bajos de p representan un ajuste pobre del modelo, mientras que altos valores ($p > 0.05$), indican un buen ajuste.

La capacidad predictiva de los modelos fue evaluada usando el área bajo una curva ROC (Receiver Operating Characteristic). El valor de dicho estadístico va de 0 a 1, de manera que el poder de predicción de un modelo incrementa tanto como el

estadístico se aproxime a 1. Por ejemplo, un valor de 0.5 indica que el modelo tiene una probabilidad del 50% de clasificar apropiadamente la variable respuesta dicotómica (Hosmer & Lemeshow, 2000).

Por otro lado, se calcularon coeficientes de correlación de Pearson (r) con el procedimiento CORR de SAS 9.2, para probar la relación lineal entre las variables morfológicas iniciales (altura, diámetro, PSA, PSR, PST, relación PSA/PSR, relación H/D e ICD) y las variables de crecimiento en campo a los 14 meses después de establecer la plantación. También, se modeló la relación entre las variables obtenidas en campo y las variables explicativas iniciales a través de la regresión lineal múltiple, utilizando el procedimiento REG de SAS 9.2. Se aplicó el método selección en pasos hacia atrás (Backward selection) para las variables independientes, de manera que las variables no significativas fueron retiradas hasta que todas las variables restantes fueran significativas a $p \leq 0.05$.

En seguida se evaluó el ajuste de los modelos mediante análisis de residuales, asumiendo los supuestos de normalidad y homocedasticidad de los mismos, y cuando estos supuestos no se cumplieron, las variables fueron transformadas con logaritmos neperianos o raíz cuadrada; además, se calcularon los coeficientes de determinación (R^2) para ilustrar el porcentaje de variación de la variable respuesta que es explicado por las variables predictivas. Para el análisis de regresión, se excluyeron las variables relación PSA/PSR, relación H/D e ICD para evitar la multicolinealidad en los modelos, ya que estas variables dependen de otras variables simples.

5.6 Resultados y discusión

5.6.1 Supervivencia en campo

El modelo de regresión logística completo mostró un efecto significativo del sitio de plantación ($p < 0.001$) en la probabilidad de supervivencia; sin embargo, el efecto del sistema de producción y del preacondicionamiento mediante la inducción del estrés hídrico no fue significativo. Además, se encontró influencia significativa del diámetro inicial de las plántulas ($p = 0.0014$) en la supervivencia a 14 meses de

establecidas; no obstante, la altura inicial y biomasa, tanto de la parte aérea como de la raíz, no fueron significativos. Por otra parte, al realizar la discriminación de las variables mediante la selección de pasos hacia atrás, se encontró un efecto altamente significativo del diámetro inicial de las plántulas ($p < 0.0001$), seguido del sitio de plantación ($p < 0.001$) y sistema de producción ($p = 0.045$), así como la variable de peso seco de la parte aérea ($p = 0.013$) (Cuadro 5.1).

Cuadro 5.1. Estadísticas del modelo de regresión logística para la estimación de la probabilidad de supervivencia considerando los factores fijos independientes y las variables morfológicas iniciales.

Parámetro		GL	Estimador	Error estándar	Chi ² de Wald	Pr > Chi ²
<i>Modelo completo (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.13; ROC=0.901)</i>						
Intercepto		1	-5.779	1.500	14.840	0.0001
Sitio de plantación	1	1	-1.011	0.286	12.506	0.0004
Sistema de producción	Bs	1	1.580	0.797	3.936	0.0473
	Bt	1	0.769	0.641	1.439	0.2303
Preacondicionamiento	A	1	0.328	0.350	0.878	0.3488
	M	1	-0.437	0.340	1.649	0.1991
Diámetro inicial		1	1.638	0.511	10.265	0.0014
Altura inicial		1	-0.038	0.063	0.379	0.5384
Peso seco aéreo		1	-0.321	0.468	0.469	0.4933
Peso seco de raíz		1	-0.450	2.047	0.048	0.8258
<i>Modelo seleccionado (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.53; ROC=0.897)</i>						
Intercepto		1	-6.307	0.941	44.948	<0.0001
Sitio de plantación	1	1	-0.981	0.281	12.194	0.0005
Sistema de producción	Bs	1	1.239	0.519	5.691	0.0170
	Bt	1	0.673	0.600	1.259	0.2618
Diámetro inicial		1	1.671	0.347	23.212	<0.0001
Peso seco aéreo		1	-0.550	0.221	6.213	0.0127

La supervivencia de *P. pseudostrobus* estuvo asociada positivamente al diámetro inicial de los brinzales, con una razón de probabilidad (probabilidad de ocurrencia sobre la de no ocurrencia) de 5.32, lo que indica que con el aumento de un milímetro en diámetro, las plántulas tendrían 5.3 veces más posibilidades de supervivencia en campo, manteniéndose las demás variables constantes; en cambio la variable peso seco aéreo está asociada negativamente con la probabilidad de supervivencia, de tal manera que las plántulas con mayor biomasa aérea tendrían menor probabilidad de supervivencia.

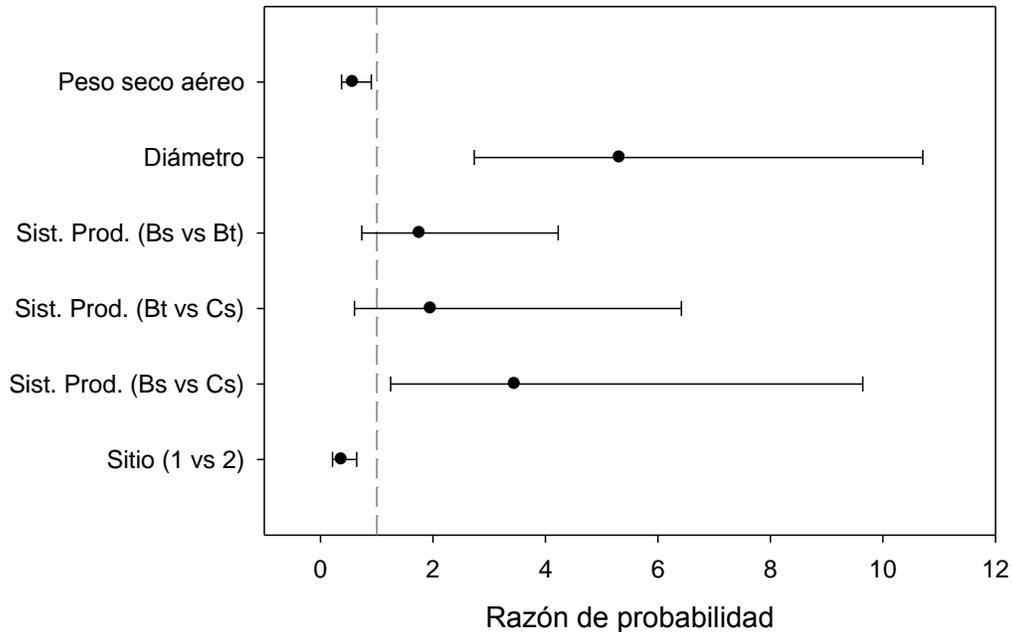


Figura 5.1. Razones de probabilidad y sus intervalos de confianza de los factores principales que afectan la supervivencia de *Pinus pseudostrobus*. La línea punteada indica razón de probabilidad de 1.0, por lo que las comparaciones cuyo intervalo de confianza intercepta dicha línea, simbolizan un estimador no significativo ($p < 0.05$) en el modelo de regresión.

Por otra parte, el estimador de la comparación del sistema convencional en bolsa (2+0) contra el sistema de producción en charola (1+0) fue significativo ($p=0.017$) con una razón de probabilidad de 3.45, lo que significa que las plántulas cultivadas bajo el sistema 2+0 tienen 3.4 más probabilidades de supervivencia; el sistema de producción con trasplante a bolsa (1+1) no tuvo probabilidades estadísticamente diferentes contrastado con los sistemas 2+0 y 1+0. La comparación de los sitios de plantación (Sitio 1 contra Sitio 2) mostró una razón de probabilidad de 0.37, es decir que las plantas establecidas bajo las condiciones del Sitio 1 tienen una menor probabilidad de supervivencia comparadas con las plántulas en condiciones del Sitio 2 (Figura 5.1).

Los modelos de regresión ajustados para cada condición de plantación, excluyendo los efectos de preacondicionamiento y sistema de producción, y dejando sólo las variables morfológicas, muestran que la supervivencia de *Pinus pseudostrobus* está influenciada significativamente por el diámetro inicial de las

plántulas ($p < 0.0001$). Para ambos sitios, en los modelos seleccionados la prueba de bondad de ajuste de Hosmer-Lemeshow presentó valores de p mayores que 0.05, por lo que se acepta la hipótesis nula de que los modelos tienen un ajuste adecuado (Cuadro 5.2). No obstante, las razones de probabilidad variaron en cada sitio de plantación, por una parte en condiciones del Sitio 1, el aumento en 1 mm de diámetro al momento de plantar incrementa casi tres veces la probabilidad de supervivencia, mientras que en bajo condiciones del Sitio 2, el mismo aumento representa cinco veces más probabilidades de supervivencia.

Cuadro 5.2. Estadísticas del modelo de regresión logística para la estimación de la probabilidad de supervivencia en función de variables morfológicas iniciales de la planta.

Parámetro	GL	Estimador	Error estándar	Chi ² de Wald	Pr > Chi ²	Razón de probabilidad
SITIO 1						
<i>Modelo completo (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.47; ROC=0.863)</i>						
Intercepto	1	-5.932	1.453	16.662	<0.0001	
Diámetro inicial	1	1.201	0.394	9.287	0.0023	3.32
Altura inicial	1	0.006	0.064	0.009	0.9263	1.01
Peso seco aéreo	1	-0.913	0.409	4.988	0.0255	0.40
Peso seco de raíz	1	2.864	1.877	2.329	0.1270	17.53
<i>Modelo seleccionado (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.074; ROC=0.858)</i>						
Intercepto	1	-5.078	0.704	52.064	<0.0001	
Diámetro inicial	1	1.060	0.144	53.927	<0.0001	2.89
SITIO 2						
<i>Modelo completo (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.85; ROC=0.927)</i>						
Intercepto	1	-4.134	2.669	2.398	0.1215	
Diámetro inicial	1	1.172	0.721	2.645	0.1039	3.23
Altura inicial	1	-0.172	0.130	1.760	0.1847	0.84
Peso seco aéreo	1	0.909	1.228	0.548	0.4593	2.48
Peso seco de raíz	1	0.446	2.438	0.033	0.8549	1.56
<i>Modelo seleccionado (Prueba de bondad de ajuste Hosmer - Lemeshow=0.45; ROC=0.924)</i>						
Intercepto	1	-6.681	0.876	58.206	<0.0001	
Diámetro inicial	1	1.624	0.199	66.938	<0.0001	5.07

De la misma forma en estudios recientes con diferentes especies del género *Pinus*, se ha demostrado que el diámetro al cuello de la raíz está estrechamente relacionado con la supervivencia en campo (South *et al.*, 2005; Dumroese *et al.*, 2009; Kabrick *et al.*, 2011; Grossnickle, 2012; Tsakalimi *et al.*, 2013), debido principalmente a que el diámetro se relaciona con algunas funciones fisiológicas de

la planta, como la transpiración cuticular (Villar *et al.* 1997), o el metabolismo, que a su vez depende de las reservas de carbohidratos no estructurales (Guehl *et al.*, 1993).

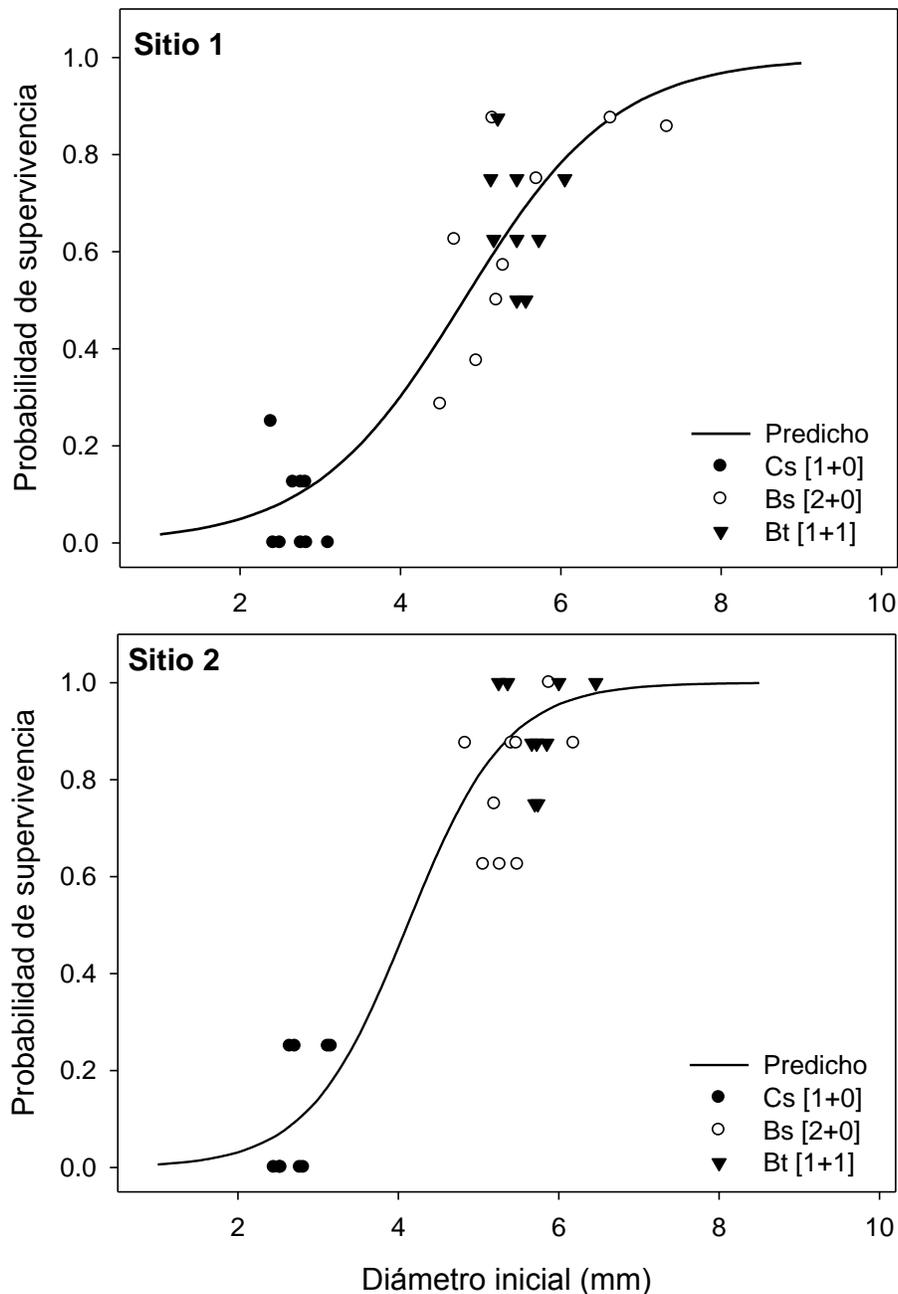


Figura 5.2. Probabilidad de supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en cada sitio de plantación en función del diámetro inicial. Cada punto representa la supervivencia observada por repetición para cada sistema de producción.

En este caso, se puede afirmar que las plántulas de *P. pseudostrobus* con diámetros mayores a 6.5 mm tendrán una probabilidad de supervivencia mayor del

80% en el primer periodo de crecimiento, mientras que las plántulas con diámetros menores de 4 mm tendrán una probabilidad de supervivencia no mayor de 40%, aunque esto será condicionado por la calidad del sitio de plantación, ya que en este ensayo, las plántulas con diámetros mayores de 6.5 mm establecidas en el Sitio 2, tuvieron promedios de supervivencia del 90 y hasta 100% (Figura 5.2).

5.6.2 Crecimiento inicial

Se encontró una correlación significativa de todas las variables morfológicas iniciales con las variables diámetro y altura la final del periodo de evaluación. El diámetro inicial, índice de calidad de Dickson (ICD) y el peso seco de la raíz (PSR) fueron las variables de mayor correlación con el diámetro final, mientras que la altura inicial y la relación PSA/PSR, así como peso seco de la parte aérea (PSA) fueron las variables de mayor correlación con la altura total final (Cuadro 5.3). En un estudio con *Pinus palustris*, Rodríguez y Duryea (2003), también encontraron una asociación entre el peso anhidro de la raíz y el diámetro al cuello después de un año de establecimiento, a así como la biomasa de las acículas primarias se correlacionó con y la altura total del tallo.

Cuadro 5.3. Coeficientes de correlación de Pearson para la relación entre las variables morfológicas iniciales y las variables de crecimiento de *Pinus pseudostrabus* a 14 meses de establecimiento en campo

Variables morfológicas iniciales	Variables de crecimiento en campo						
	n=225				n=36		
	Diámetro	Altura	TRCD	TRCH	PSA	PSR	PST
Diámetro inicial	0.82***	0.50***	-0.28***	0.08	0.36*	0.35*	0.38*
Altura inicial	0.26***	0.96***	-0.28***	-0.40***	0.23	0.08	0.20
Peso seco aéreo (PSA)	0.64***	0.82***	-0.31***	-0.20**	0.39*	0.29	0.38*
Peso seco de la raíz (PSR)	0.80***	0.50***	-0.28***	0.05	0.24	0.19	0.24
Peso seco total	0.68***	0.78***	-0.31***	-0.16*	0.37*	0.27	0.36*
Relación altura/diámetro	-0.25***	0.70***	-0.12	-0.50***	-0.06	-0.19	-0.10
Relación PSA/PSR	0.16*	0.93***	-0.25***	-0.44**	0.57**	0.39*	0.55***
ICD	0.80***	0.29***	-0.23***	0.17*	0.24	0.25	0.26

La correlación es significativa a * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ y *** $p < 0.001$. TCRD=Tasa relativa de crecimiento en diámetro, TCRH=Tasa relativa de crecimiento en altura.

Para las variables de producción de biomasa se obtuvieron menores coeficientes de correlación; la relación PSA/PSR presentó la mayor asociación

principalmente con el peso seco de la parte aérea y total; igualmente, el diámetro inicial tuvo una correlación significativa con las variables de biomasa al final del periodo de evaluación

El hecho de que el diámetro y altura al momento de plantar se relacionen directamente con el diámetro y la altura al final del periodo de evaluación, respectivamente, indica que durante los primeros meses de establecimiento de la plantación, aún permanecen las características morfológicas iniciales. Pinto (2011) afirma que las plántulas de mayor altura al momento de plantar mantienen su ventaja en campo; así, la altura inicial no siempre indica que la planta tendrá mayor incremento absoluto; en este sentido, la calidad del sitio de plantación puede influir más en la diferenciación del crecimiento, incluso en diferentes tamaños de contenedor (Pinto *et al.*, 2011)

En este estudio se observó una correlación negativa significativa de la tasa de crecimiento en altura con la altura inicial, la relación altura/diámetro, la relación PSA/PSR, lo que significa que las plántulas de mayor altura tienen un menor desarrollo en los primeros meses ya que es posible que exista un desbalance entre el tallo y raíz lo que conduce a una mayor susceptibilidad al estrés en campo a pesar de una aparente condición buena de la planta (Lamhamedi *et al.*, 1996). Aunque Cuesta *et al.* (2010) encontraron que las plantas más grandes tienen mayor producción de nuevas raíces que las plantas chicas. Asimismo, la tasa de crecimiento en diámetro presentó una correlación negativa significativa con la mayoría de las variables morfológicas iniciales, principalmente con el peso seco; al respecto, Haase and Rose (1993) encontraron que las plántulas de *Pseudotsuga menziessi* con mayor volumen radicular exhibieron menor crecimiento relativo en diámetro.

Los resultados de la regresión lineal múltiple, muestran que la variación del diámetro al final del periodo de evaluación se pudo explicar en un 71% con las variables diámetro inicial, peso seco aéreo y peso seco de raíz, esta última con el

mayor valor en su estimador. Por otra parte, el diámetro inicial, la altura inicial y peso seco de la raíz explican hasta en 92% la variación de la altura final (Cuadro 5.4).

En el caso de las variables de producción de biomasa (PSA, PSR y PST) se encontraron menores valores de ajuste, cuya variación fue explicada en su mayor proporción por el peso seco de la parte aérea al momento de establecer la plantación, seguida del peso seco de la raíz, aunque esta variable presentó un signo negativo en el estimador de la transformación por raíz cuadrada. Asimismo, la variable altura inicial estuvo relacionada con las variables de biomasa con signo negativo del estimador, lo que indica que las plantas más pequeñas tendrán una mayor cantidad de biomasa a los 14 meses de establecimiento, si se mantuviesen constantes las otras variables.

Cuadro 5.4. Estimadores de los parámetros de la regresión y sus estadísticos relacionados para los modelos seleccionados para la predicción del crecimiento en campo en función de las características morfológicas iniciales de plántulas de *Pinus pseudostrobus*.

Variable dep.	Variables independientes									Estadísticos de ajuste		
	β_0	D_i	$\sqrt{D_i}$	H_i	$\sqrt{H_i}$	PSA_i	$\sqrt{PSA_i}$	PSR_i	$\sqrt{PSR_i}$	R^2	CME	n
$\ln(D)$	-1.91 ^{ca}	-5.37 ^c	-	-	-	-	-0.73 ^c	3.81 ^b	35.5 ^b	0.71	0.123	225
\sqrt{H}	-2.28 ^b	-	2.88 ^a	-	0.9 ^a	-	-	-	-4.07 ^b	0.92	0.216	225
$\ln(PSA)$	6.95 ^b	-	-	-0.02 ^c	-	-1.22 ^c	6.45 ^b	8.2 ^c	-20.3 ^b	0.57	0.253	36
$\ln(PSR)$	2.17 ^a	-	-	-	-0.37 ^c	-	1.92 ^a	-	-2.85 ^b	0.31	0.332	36
$\ln(PST)$	7.52 ^b	-	-	-	-0.26 ^c	-1.17 ^c	6.27 ^b	7.69 ^c	-19.14 ^c	0.55	0.251	36

Parámetros de regresión significativos al nivel de ^a $p < 0.001$, ^b $p < 0.01$ y ^c $p < 0.05$. D_i =Diámetro inicial; H_i =Altura inicial; PSA =Peso seco de la parte aérea; PSR =Peso seco de la raíz; β_0 =Intercepto de la regresión; CME =Cuadrado medio del error de la regresión.

Pinto *et al.* (2011) afirman que el uso de variables morfológicas simples para predecir el crecimiento absoluto de *Pinus ponderosa*, resultan poco concluyentes, ya que no explican grandes proporciones de la variación en el crecimiento de las plántulas en campo. Por ello, cuando se incluyen diferentes variables morfológicas iniciales en un modelo para explicar el crecimiento en campo, se pueden mejorar los estadísticos de bondad de ajuste comparado con los indicadores simples (Jacobs *et al.*, 2005).

Otros autores discuten sobre otras ventajas que representa la utilización de indicadores morfológicos para predecir el desempeño de una reforestación; por ejemplo, en plantaciones de *Pinus banksiana* y *Pinus strobus*, Noland *et al.*, (2001) encontraron una correlación positiva significativa entre el diámetro del cuello de la raíz y la capacidad de competencia con herbáceas a cinco años de haber establecido la plantación, además en *P. banksiana* la altura inicial se correlacionó negativamente con la capacidad de competencia. Asimismo, las plántulas de *Pinus radiata* con menor diámetro inicial a la base del suelo, fueron afectadas por la competencia con malezas (Mason, 2001). En otro estudio con *Pseudotsuga menziesii*, se concluyó que la diferencia en 2 mm de diámetro al momento de plantar, representa un incremento en volumen entre 35 y 43% al cuarto año de haber establecido la plantación (Rose & Ketchum, 2003).

5.7 Conclusiones

El diámetro al cuello de la raíz en las plántulas de *Pinus pseudostrobus*, se relaciona directamente con su supervivencia en campo en la primera época de crecimiento, por lo que puede ser usada como variable predictiva e indicador de calidad para la selección de planta en proyectos de reforestación.

La altura y diámetro de los brinzales al momento de establecer la plantación, tienen una correlación positiva significativa con la altura y diámetro a 14 meses de plantación, respectivamente. Por otra parte, la tasa de crecimiento en altura presenta una correlación negativa con la altura inicial de las plántulas y la relación altura/diámetro, lo que indica que los brinzales más pequeños y robustos tienen una mejor capacidad de crecimiento.

El peso seco de la parte aérea al momento de plantar, se relaciona mayormente con la producción de biomasa en campo, no obstante con coeficientes de correlación y determinación bajos, por lo que se deben buscar otras variables ambientales que puedan explicar en mayor proporción los incrementos de biomasa en las plantas.

5.8 Referencias

- Cregg, B.M. 1994. Carbon allocation, gas exchange, and needle morphology of *Pinus ponderosa* genotypes known to differ in growth and survival under imposed drought. *Tree Physiology* 14:883-898.
- Cuesta B., J. Vega, P. Villar-Salvador and J. M. Rey-Benayas. 2010. Root growth dynamics of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) seedlings in relation to shoot elongation, plant size and tissue nitrogen concentration. *Trees* 24:899-908.
- Dumroese, R. K., J. P. Barnett, D. P. Jackson and M. J. Hains. 2009. 2008 Interim guidelines for growing longleaf pine seedlings in container nurseries. In: Dumroese, R.K.; Riley, L.E. (eds). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations - 2008*. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Fort Collins, CO. U.S. pp. 101 - 107. Online: http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p058.html
- Grossnickle S. C. 2012. Why seedlings survive: influence of plant attributes. *New Forests* 43 (5-6):711–738.
- Guehl, J. M., A. Clement, P. Kaushal and G. Aussenac. 1993. Planting stress, water status and non-structural carbohydrate concentrations in Corsican pine seedlings. *Tree Physiology* 12: 173-183.
- Haase D. L. and R. Rose. 1993. Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2+0 Douglas-fir seedlings of varying root volumes. *Forest Science* 39(2):275-294.
- Hosmer, D. W. and S. Lemeshow. 2000. Applied Logistic Regression. Wiley-Interscience. New York. 392 p.
- Jacobs, D. F., K. F. Salifu and J. R. Seifert. 2005. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. *New Forests* 30(2-3):235–251
- Kabrick J. M., D. C. Dey, S. R. Shifley and J. L. Villwock. 2011. Early survival and growth of planted shortleaf pine seedlings as a function of initial size and overstory stocking. In: Fei, S., J. L. Lhotka, J. Stringer, K. W. Gottschalk and G.W. Miller (eds.) *Proceedings, 17th Central Hardwood Forest Conference; 2010 April 5-7; Lexington, KY*. Newtown Square, PA: USDA Forest Service, Northern Research Station: 277-286. Disponible en: <http://nrs.fs.fed.us/pubs/38062>.
- Lamhamedi M. S., P. Y. Bernier and C. Hebert. 1996. Effect of shoot size on the gas exchange and growth of containerized *Picea mariana* seedlings under different watering regimes. *New Forests* 13: 207–221.
- Landis T. D. 2011. The target plant concept. A history and brief overview. In: Riley L. E., Haase D. L., Pinto J. R. (tech. coord.). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations-2010*. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 61-66. Disponible en: http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p065.html

- Li G. L., Y. Liu, Y. Zhu, J. Yang, H. Y. Sun, Z. K. Jia and L. Y. Ma. 2011. Influence of initial age and size on the field performance of *Larix olgensis* seedlings. *New Forests* 42(2): 215-226.
- Mason E.G. 2001. A model of the juvenile growth and survival of *Pinus radiata* D. Don. Adding the effects of initial seedling diameter and plant handling. *New Forests* 22: 133–158.
- Noland T. L., G. H. Mohammed and R. G. Wagner. 2001. Morphological characteristics associated with tolerance to competition from herbaceous vegetation for seedlings of jack pine, black spruce, and white pine. *New Forests* 21:199–215.
- Ortega U. J., Majada, A. Mena P., J. Sanchez Z., N. Rodriguez I., K. Txarterina, J. Azpitarte and M. Duñabeitia. 2006. Field performance of *Pinus radiata* D. Don produced in nursery with different types of containers. *New Forests* 31(1):97–112.
- Pinto J. R. 2011. Morphology targets: what do seedling morphological attributes tell us? In: Riley, L. E., D. L. Haase, J. R. Pinto (eds). *National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations - 2010*. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 74-79. Disponible en: http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p065.html.
- Pinto J. R., J. D. Marshall, R. K. Dumroese, A. S. Davis and D. R. Cobos. 2011. Establishment and growth of container seedlings for reforestation: A function of stocktype and edaphic conditions. *Forest Ecology and Management* 261:1876–1884.
- Rodríguez T., D. A. y M. L. Duryea. 2003. Indicadores de calidad de planta en *Pinus palustris* Mill. *Agrociencia* 37: 299-307.
- Rose R. and D. L. Haase. 2005. Root and shoot allometry of bareroot and container Douglas-fir seedlings. *New Forests* 30:215–233.
- Rose R. and J. S. Ketchum. 2003. Interaction of initial seedling diameter, fertilization and weed control on Douglas-fir growth over the first four years after planting. *Annals of Forest Sciences*. 60: 625–635.
- Rowan, S. J. 1987. Nursery seedling quality affects growth and survival in outplantings. Georgia Forestry Commission, Georgia Forest Research Paper # 70. 15 p.
- SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 2009. SAS Ver. 9.2. SAS Inc., Cary, NC.
- South, D. B. 2000. Planting morphologically improved pine seedlings to increase survival and growth. Forestry and Wildlife Research Series N° 1. Alabama Agricultural Experiment Station. Auburn University, Alabama. 14 p.
- South D. B., S. W. Harris, J. P. Barnett, M. J. Hains and D. H. Gjerstad. 2005. Effect of container type and seedling size on survival and early height growth of *Pinus palustris* seedlings in Alabama, U.S.A. *Forest Ecology and Management* 204(2):385-398.
- Thompson, B.E. 1985. Seedling morphological evaluation. What you can tell by looking. In: Duryea M. (ed.). *Evaluating Seedling Quality: principles, procedures, and predictive*

abilities of major tests. Proceedings of a workshop held October 16-18, 1984, Forest Research Laboratory, Oregon State University.

Tsakaldimi M., P. Ganatsas and D. F. Jacobs. 2013. Prediction of planted seedling survival of five Mediterranean species based on initial seedling morphology. *New Forests* 44(3):227-339.

Villar S. P., L. Ocaña B., J. L. Peñuelas R. y I. Carrasco. 1997. Efecto de diferentes niveles de endurecimiento por estrés hídrico en el contenido de nutrientes y la resistencia a la desecación de plántulas de *Pinus halepensis* Mill. *Actas del II Congreso Forestal Español*. Pamplona. pp.: 673-678.



Plántula de Pinus pseudostrobus en los primeros meses de establecimiento, Galeana, N.L.
Foto. José A. Sigala R.
Agosto de 2012

CAPÍTULO VI

6 CONSIDERACIONES FINALES

De los resultados obtenidos en la fase de vivero, se concluye que aquellas variables morfológicas que describen, en buena proporción, el estado de otras variables tanto morfológicas como fisiológicas, pueden ser usadas también para el monitoreo del desarrollo de las plantas en vivero, de modo que se puedan ajustar las técnicas de cultivo para incrementar la calidad de plántulas previo a la finalización del ciclo de producción, lo que beneficiaría el establecimiento y desarrollo temprano de la plantación. Además, las ecuaciones alométricas se pueden aplicar en la evaluación y selección de plántulas para los programas de reforestación, mediante muestreos no destructivos.

La diferencia de supervivencia y crecimiento entre los sitios de plantación ilustra la importancia de considerar las condiciones edáficas y topográficas de las áreas de reforestación antes del establecimiento de la plantación para definir las características que debe tener la planta que se utilizara para tal fin. Las condiciones topográficas como exposición y pendiente, así como el microambiente, son características importantes del sitio a tener en cuenta para lograr un mejor desempeño de la plantación en los primeros años. También se presume que la humedad y temperatura del suelo, también son variables que determinan el establecimiento de las plantas en los primeros meses; por ello, se recomienda realizar estudios en los que sean incluidas como variables edáficas del sitio de plantación.

El hecho de implementar sistemas de producción tecnificados para el cultivo de plantas en contenedores de bajo volumen, se ha basado equivocadamente en la reducción de costos y optimización de los procesos productivos dentro del mismo vivero; no obstante, lo que se observó en este estudio y lo reportado en otros trabajos recientemente, demuestra que los contenedores de mayor volumen tienen

un mejor desempeño en campo; entonces, si se hace un balance de las veces que sería necesario plantar en un mismo sitio debido a las bajas tasas de supervivencia, seguramente el ahorro en el gasto de producción sería superado por el gasto de establecimiento. Por esta razón, es importante realizar análisis de costo-beneficio para determinar el tamaño ideal de envase en cada región, así como la duración de los ciclos de producción que maximicen la supervivencia en campo y que minimice los costos de producción en vivero.

El preacondicionamiento en vivero no modifica significativamente la morfología de las plántulas; sin embargo, en campo se pudo observar cierta influencia en la supervivencia y crecimiento dependiendo del sistema de producción, por lo que esta práctica puede ser aplicada cuando las plántulas tengan mayor talla para promover mecanismos de evitación a la sequía, como la reducción de la transpiración. También, se recomienda probar una mayor duración del periodo de preacondicionamiento para lograr acentuar mecanismos de resistencia a la sequía.

Las variables morfológicas de las plantas tienen una buena capacidad para predecir la supervivencia y crecimiento absoluto o relativo de las plántulas en campo, por lo tanto, pueden ser utilizadas como indicadores en la selección de plántulas en vivero; asimismo, si se conoce la condición del área de plantación, se tiene la posibilidad de distribuir los lotes de planta para diferentes calidades de sitio. Además, cuando se evalúa la calidad de planta de un vivero, se puede conocer la homogeneidad de los lotes de producción; de esta manera, los mismos parámetros ayudarían a determinar el porcentaje del lote de plantas que tendría la capacidad de desarrollarse adecuadamente en campo.

Finalmente, las investigaciones sobre producción de planta forestal en México, deben ser derivadas del desempeño de las reforestaciones; de manera que, es necesario que exista una retroalimentación por parte quienes ejecutan los proyectos de plantación hacia los viveros, para que en base a los resultados obtenidos en campo se mejoren las técnicas para producir plántulas de buena calidad.

ACERCA DEL AUTOR



El Ing. José Ángel Sigala, candidato a obtener el grado de Maestría en Ciencias Forestales por la Facultad de Ciencias Forestales (UANL), nació el 18 de febrero de 1987 en el ejido Ignacio Zaragoza, municipio de Durango, Dgo., en donde cursó sus estudios primarios de 1992 a 1998, después se mudó a la capital del estado para cursar la secundaria técnica durante el periodo de 1998 a 2001. En julio de 2001, ingresó a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo en Texcoco, Estado de México, la cual concluyó en 2004, para luego cursar sus estudios profesionales de Ingeniero en Restauración Forestal (2004-2008), en la misma universidad. Una vez egresado, trabajó como apoyo técnico en el Campo Experimental Valle del Guadiana del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de julio a septiembre de 2008, y a partir de octubre de ese mismo año, fue contratado como Investigador Asistente para el C. E. Sierra de Chihuahua del INIFAP en Cd. Cuauhtémoc, Chih., en el cual actualmente está adscrito como Investigador Asociado C, dentro del programa de Plantaciones y Sistemas Agroforestales.

Contacto: sigala.jose@inifap.gob.mx