



DOI: <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i64.831>

Artículo

Factores ambientales y físicos que afectan la supervivencia de siete especies forestales en el Estado de México
Environmental and physical factors affecting the survival of seven forest species in the State of Mexico

Juan Manuel Torres Rojo¹

Abstract

This research aims to assess the effect of different environmental variables on the survival of the seven species most used for reforestation in the State of Mexico along the 1997-2003 period. The evaluation was implemented through a two-stage sampling procedure in 757 plantations. In the first stage the plantations to be evaluated were chosen throughout a completely random design. In the second stage, a set of sites of 100 m² were systematically chosen in each selected plantation with a 5 % sampling intensity. Survival and a set of site variables were evaluated in each site. The analysis was performed through a Probit model by testing all combinations of different subsets of site and climate variables as independent variables. Results show low survival (38 %) in plantations, driven by low protection after plantations were established, the rapid conversion to agricultural land, as well as the disengagement between the environmental requirements of the species and the characteristics of the plantation sites. The effect of the environmental variables on each species is analyzed and discussed, and some suggestions for recording plantation information are highlighted.

Key words: Evaluation, forest plantations, Probit, restoration, survival, site variables.

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de diferentes variables ambientales y físicas sobre la supervivencia de las siete especies más usadas para la reforestación en el Estado de México, durante el periodo 1997-2003. La evaluación se realizó a través de un muestreo de dos etapas de 757 plantaciones. En la primera, se seleccionaron aleatoriamente las plantaciones bajo un diseño completamente al azar. La segunda fase consistió en levantar sitios de muestreo de 100 m² elegidos de manera sistemática en cada una de las plantaciones seleccionadas, con una intensidad de muestreo de 5 % del área plantada. En los sitios se evaluó la supervivencia y un conjunto de variables de sitio. El análisis se realizó mediante un modelo *Probit*, en el cual se probaron todas las combinaciones de diferentes subconjuntos de variables de sitio y climáticas como variables de control. Los resultados mostraron que las plantaciones tienen una baja supervivencia (38 %), atribuible a la poca protección de las plantaciones, la rápida conversión a terreno agropecuario, así como a la desvinculación entre los requerimientos de cada especie y las características de los sitios de plantación. Se analiza y discute el efecto de las variables evaluadas por especie y se proporcionan recomendaciones de registro de información para las plantaciones.

Palabras clave: Evaluación, plantaciones forestales, *Probit*, restauración, supervivencia, variables de sitio.

Fecha de recepción/Reception date: 18 de agosto de 2020.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 10 de noviembre de 2020.

¹Centro de Investigación y Docencia Económicas. México.

Autor por correspondencia; correo-e: juanmanuel.torres@cide.edu.

Introducción

Los esfuerzos de restauración en México han sido importantes, tanto en inversión como en la diversidad de estrategias para el fomento de las actividades de restauración (Carabias *et al.*, 2007). Sin embargo, la mayor parte de los programas de incentivo a la restauración han tenido resultados pobres (Burney *et al.*, 2015), ya sea por problemas técnicos (selección de la especie y sitio, calidad de planta, técnica de establecimiento o manejo de la plantación, entre otros), ambientales (Carabias *et al.*, 2007, Sarukhán *et al.*, 2014), o de diseño de una estructura apropiada de incentivos (montos y dispersión de subsidios, apoyos indirectos, mecanismos de dispersión, diseño institucional para administrar los incentivos) que logre reducir las barreras culturales, económicas o sociales que limitan la deseabilidad e interés del sector privado para realizar actividades de restauración.

Desde la perspectiva técnica, el éxito en el establecimiento de las plantaciones forestales depende de cuatro factores: i) calidad y pertinencia del material genético, ii) calidad y tipo de material vegetativo que se establecerá en campo, iii) las características del sitio y adecuaciones para establecer la plantación, y iv) los cuidados y manejo de la planta en el sitio de plantación (Capó, 2001).

A pesar de que los cuatro factores son importantes, la mayor atención de investigación en México se ha centrado en el material genético y la calidad de la planta, debido tanto al alto costo de dar seguimiento a una plantación ya establecida, como a la falsa idea que considera realizado el trabajo de reforestación una vez finalizado el establecimiento de la plantación (Burney *et al.*, 2015). En consecuencia, existe una amplia variedad de resultados de investigación que describen diversos atributos morfológicos (altura, diámetro y robustez) de plántulas producidas en diferentes sustratos, envases y condiciones (Prieto, 2004; Prieto *et al.*, 2011) para lograr material vegetativo con atributos deseables. En contraste, existen pocos trabajos enfocados a definir prácticas de producción de plántula que alineen calidad de plántula y especie con los atributos de rendimiento, supervivencia y crecimiento en un sitio determinado (Mexal *et al.*, 2002, 2008).

El efecto de las condiciones de sitio sobre el desarrollo de una plantación se determina, usualmente, a través de dos estrategias metodológicas. La más común consiste en establecer un experimento controlado, en el que se prueban diferentes condiciones de sitio dentro del espectro de desarrollo de la especie por evaluar, usualmente, este espectro se limita a las condiciones de una sola localidad. Lo anterior resulta en que la extrapolación de resultados derivados de estos experimentos es limitada, en virtud de que es muy complicado encontrar condiciones similares a las del lugar donde se realiza el experimento.

Sin embargo, la estrategia puede ser eficiente cuando se prueba un número limitado de factores con repeticiones del experimento en localidades diversas. Ejemplos de esta metodología de evaluación de factores de sitio en México son los trabajos de Capó y Newton (1991); Román *et al.* (2007); Gómez-Romero *et al.* (2012); Yam-Chin *et al.* (2014); Sigala *et al.* (2015); Prieto *et al.* (2018); Barrera *et al.* (2018) y Muñoz-Flores *et al.* (2019).

La segunda estrategia es el uso de un experimento natural; esto es, una o varias plantaciones ya establecidas, donde se conocen tanto el origen y características de la plántula, como la técnica de establecimiento. El procedimiento consiste en tomar muestras con ciertas características de aleatoriedad, con lo cual es posible relacionar las variables de sitio con la variable de respuesta que se analiza. El procedimiento no proporciona una línea de causalidad directa, pero ayuda a identificar las variables de planta y sitio más relevantes para el éxito de la plantación. Ejemplos de esta metodología de evaluación de factores de sitio en México son los trabajos de Arteaga-Martínez (2000); Contreras y Rodríguez (2004); Muñoz *et al.* (2009; 2012); Montero *et al.* (2011); Muñoz *et al.* (2011a).

El presente estudio es un aporte en la identificación de mejores prácticas para el establecimiento de plantaciones forestales (Capó, 2001); su objetivo es el análisis de los factores ambientales y físicos relacionados con la supervivencia de plantaciones de 5-10 años establecidas en el Estado de México. El trabajo es importante porque

identifica el desempeño en supervivencia de plántulas de varias especies con características fisiológicas y morfológicas similares en diferentes condiciones de sitio.

Materiales y Métodos

Muestreo

El análisis de los factores que afectan la supervivencia se realizó a partir de la información derivada de la evaluación de plantaciones establecidas entre 1997-2003 dentro de los programas de “forestación, reforestación y plantaciones forestales comerciales de la Protectora de Bosques del Estado de México (Probosque)”. El marco muestral se integró con el padrón de beneficiarios de esos programas (Figura 1), quienes se agruparon en cuatro regiones del Estado de México: I Toluca, V Atlacomulco, VI Coatepec Harinas, y VII Valle de Bravo. La planta usada en las reforestaciones provino de seis de los 18 viveros que, actualmente, tiene Probosque.



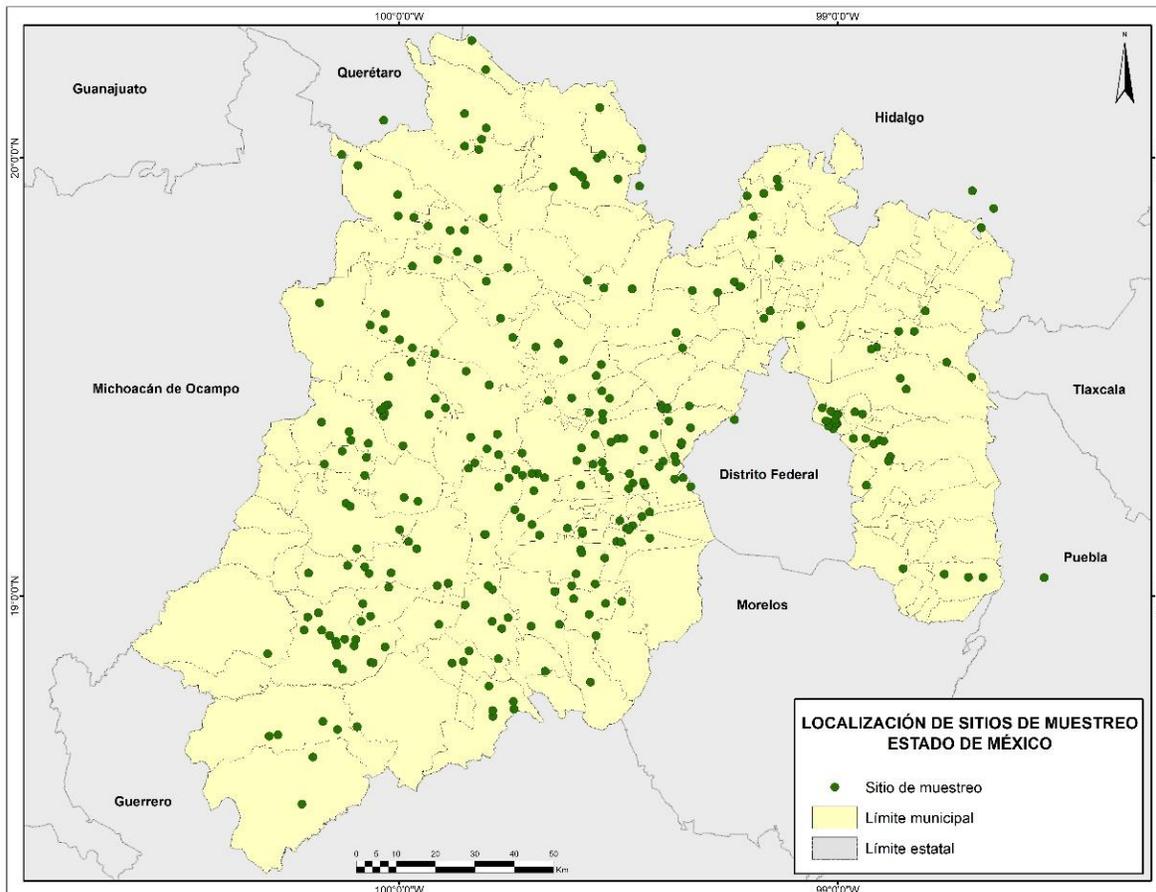


Figura 1. Distribución de las plantaciones incluidas en los programas de beneficios de Probosque en el periodo 1997-2003.

La muestra de las plantaciones evaluadas se estimó con base en un diseño de muestreo de dos etapas. En la primera, se seleccionaron las plantaciones por evaluar mediante un muestreo aleatorio probabilístico simple, con un nivel de confianza de 95 %. Se usó la superficie (ha) de la plantación como variable indicadora de la fuente de variación (promedio=2.16; desviación estándar = 0.56). El tamaño de muestra fue de 296 plantaciones de un total de 757 (fracción de muestreo = 39 %) registradas en el padrón de beneficiarios de Probosque. En la segunda etapa, cada plantación se muestreó de manera sistemática, con una intensidad de muestreo de 5.0 %, respecto del área de la plantación. Se usaron sitios de muestreo circulares de 100 m² (5.64 m de radio) de superficie, con una orientación Este-Oeste (líneas separadas a 20 m y 100 m entre sitio y sitio dentro de cada línea). La información recabada se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Información colectada en cada sitio de muestreo.

Variable	Acrónimo	Categorías
Supervivencia	Sup	Individuos vivos / total de individuos plantados
Cobertura arbórea	CobArb	1: 0-20 %, 2: 21-40 %, 3: 41-60 %, 4: 61-80 %, 5: 81-100 %; 0: Otra
Erosión	Ero	1: No perceptible; 2: Ligera; 3: Intensa; 4: Muy intensa; 0: otra
Exposición	Exp	1: Norte; 2: Sur; 3: Este; 4: Oeste; 5: Zenital; 6: Noreste; 7: Sureste; 8: Suroeste; 9: Noroeste; 0: Otra
Fisiografía	Fisio	1: Valle; 2: Terraza; 3: Planicie; 4: Barranca; 5: Meseta; 6: Ladera; 7: Lomerío; 8: Bajo; 0: Otra
Materia Orgánica	MatOrg	1: Ligera; 2: Mediana; 3: Gruesa; 4: Tepetate; 0: otra
Pedregosidad	Ped	1: Ligera; 2: Mediana; 3: Abundante; 0: Otra
Pendiente	Pend	1: 0-25 %; 2: 25-40 %; 3: Más de 40 %; 0: Otra
Profundidad del suelo	ProfSuelo	1: 0-20 cm; 2: 21-40 cm; 3: Más de 40 cm; 0: Otra
Protección de la plantación	ProtPlant	1: Cerca; 2: Vegetación; 3: Piedra; 4: Otra; 0: No tiene
Textura del suelo	Text	1: Fina; 2: Mediana; 3: Gruesa; 4: Otra; 0: No tiene
Tipo de vegetación en el sitio	TipVeg	1: Pastizal; 2: Arbustos; 3: Herbáceo; 4: Arbolado; 0: Otro
Información Climática		
Precipitación (mm)	PP	1: 50-10; 2: 100-150; 3: 150-200; 4: 200-300; 5: 300-400; 6: 400-500; 7: 500-600; 8: 600-800; 9: 800-1 000; 10: 1 000-1 200; 11: 1 200-1 500; 12: 1 500-1 800
Temperatura (°C)	T	1: >28; 2: 26-28; 3: 24-26; 4: 22-24; 5: 20-22; 6: 18-20; 7: 16-18; 8: 14-16; 9: 12-14; 10: 10-12; 11: 8-10; 12: 6-8; 13: 5-6; 14: 4-5
Clima	W	5: Frío; 4: Semifrío; 3: Templado; 2: Semicálido; 1: Cálido

Como complemento a la información de campo, se obtuvieron datos climáticos, específicamente, precipitación anual y temperatura promedio de los sitios de plantación, a partir de las coberturas de clima de Conabio para el Estado de México (<http://geoportal.conabio.gob.mx/descargas/mapas/imagen/96/clima500kgw>). La clasificación usada en el análisis se presenta en el Cuadro 1.

Se observa que la clasificación de variable Clima está alineada a la clasificación de temperatura promedio.

Análisis

El análisis asume que las características de la planta llevada a los sitios de plantación son similares para las especies al interior de cada una de las cuatro regiones seleccionadas en la entidad, debido a que la planta procedía de un número limitado de viveros, y las prácticas de producción y manejo de planta son las mismas en los viveros regionales de Probosque. Por tanto, el probable efecto diferencial en la supervivencia atribuible a la calidad de planta es posible aproximarlos con un modelo de efectos fijos por región. Este supuesto puede ser muy débil en la medida en que la región tiene una mayor cantidad de viveros, como es el caso de la de Toluca; no obstante, no es el caso para las regiones restantes. Para realizar el análisis a nivel especie, se eliminaron todos los sitios con más de un taxon, a fin de reducir el efecto diferencial por especie.

El primer análisis fue una caracterización de los factores de sitio asociados a cada especie. Para algunas variables fue necesaria una transformación para lograr una interpretación monotónica del valor numérico. En el Cuadro 2 se presenta esta recategorización para las variables cualitativas, cuya interpretación numérica no es directa y tuvieron que transformarse.



Cuadro 2. Transformaciones usadas en el análisis.

Variable	Recategorización
Fisiografía	1: Valle, Terraza, Planicie, Meseta y Bajo; 2: Lomerío; 3: Barranca y Ladera; 0: Otra
Exposición	-1: Suroeste; -0.5: Sur, Oeste; 0: Zenital; 0.5: Norte, Este; 1: Noreste;
Materia Orgánica	0: Tepetate

Un segundo análisis consistió en determinar la relación que guarda la supervivencia de cada especie con los factores de sitio evaluados, así como las variables climáticas y las combinaciones de todas las variables. Para ello, se consideró a la supervivencia como una variable con intervalo 0 - 1 (0 – 100 %) y se usó el siguiente modelo para explorar el efecto de las variables de sitio sobre la supervivencia:

$$s_{ik} = \sum \beta_j x_{ij} + \alpha_k D_k + e_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, 8, k = 1, 2, \dots, 8 \quad \dots(1)$$

Donde:

s_{ik} = Supervivencia del *i*-ésimo sitio en la *k*-ésima región de una especie en particular

x_{ij} = Vector de *j* factores en el *i*-ésimo sitio

β_j = Vector de parámetros que caracteriza cada factor del modelo lineal

D_k = Variable dicotómica asociada a cada región

α_k = Efecto que tiene cada región (asociado a diferencia en calidad de planta) y tomando como referencia la región I (Toluca)

e_i = Error aleatorio

Dadas las características de s_{ik} (variable acotada al intervalo 0-1) fue necesario el uso de un modelo de variables dependientes cualitativas, como el modelo *Probit*. Este tipo de modelos permite predecir la probabilidad de ocurrencia (intervalo 0-1) de una variable, a partir de un conjunto de variables independientes. Dado que la probabilidad está en un intervalo (0-1), al igual que la supervivencia, el modelo *Probit* satisface el requerimiento de una variable dependiente dentro de este intervalo, a la vez que reduce los sesgos de estimación derivados del uso de transformaciones o ajustes restringidos (Maddala, 1986). El análisis se realizó evaluando todas las combinaciones posibles de variables dependientes en el modelo (1), con el uso del paquete econométrico *EViews*[®] 11 (<https://www.eviews.com/home.html>). La selección del modelo de mejor ajuste se basó en los estadísticos de razón de verosimilitud, χ^2 , parsimonia del modelo, así como la calidad de los estimadores, evaluada por su significancia estadística.

Resultados

Estadísticas generales de las plantaciones evaluadas

Las plantaciones evaluadas se componen de aproximadamente 30 especies distribuidas en una amplia gama de condiciones altitudinales, de sitio y clima. Sin embargo, el análisis solo se llevó a cabo para los taxones con alta frecuencia de sitios muestreados (más de 99 sitios) y en donde crecían de manera pura. Las siete especies que reunieron estos atributos fueron: *Cupressus lindleyi* Klotzsch ex Endl., *Pinus ayacahuite* Ehrenb. ex Schltldl., *Pinus greggii* Engelm. ex Parl., *Pinus michoacana* Martínez, *Pinus montezumae* Lamb., *Pinus patula* Schiede ex Schltldl. & Cham., y *Pinus pseudostrobus* Lindl. En el Cuadro 3 se resumen las características ambientales de los sitios evaluados para cada especie seleccionada. Destaca la supervivencia de *P. pseudostrobus* y *P. michoacana* con más de 50 %, la cual contrasta con la de *P. montezumae* y *P. greggii*, de casi 33 %.

Cuadro 3. Características ambientales y físicas promedio de los sitios evaluados.

Especies	No de sitios	Sup	Alt	Tip Veg	Cob Arb	Text	Ero	Pend	Prof Suelo	Ped	ProtPlant	Fisio	Exp	Mat Org	PP	T
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl.	885	34.64 (39.67)	2 468.14 (311.35)	1.93 (1.06)	1.06 (0.53)	1.81 (0.70)	1.92 (1.00)	1.50 (0.67)	1.52 (0.63)	1.96 (1.13)	1.17 (1.28)	1.52 (0.54)	-0.08 (0.43)	1.29 (0.77)	920 (244.3)	20 (3.9)
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltl.	250	39.11 (39.86)	2 814.54 (272.66)	1.89 (1.33)	1.24 (0.84)	1.46 (0.63)	1.02 (0.42)	1.04 (0.44)	1.59 (0.87)	0.76 (0.76)	0.48 (0.62)	1.78 (0.42)	-0.05 (0.64)	1.43 (0.63)	907 (89.5)	19 (2.8)
<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	330	31.45 (38.21)	2 629.36 (414.10)	1.82 (1.13)	1.21 (0.87)	1.66 (0.68)	1.74 (1.16)	1.29 (0.60)	1.47 (0.85)	1.64 (1.08)	0.45 (0.81)	1.67 (0.47)	-0.18 (0.46)	1.38 (0.71)	879 (140.2)	18 (3.1)
<i>Pinus michoacana</i> Mart.	99	51.88 (44.16)	2 565.03 (308.45)	2.15 (1.48)	1.00 (0.76)	1.68 (1.10)	1.46 (1.05)	1.00 (0.64)	1.31 (0.89)	0.87 (1.07)	0.32 (0.47)	1.65 (0.69)	-0.10 (0.20)	1.22 (0.84)	918 (98.7)	17 (2.9)
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	235	33.06 (41.14)	2 972.09 (505.62)	1.69 (1.22)	1.22 (0.61)	2.03 (0.45)	1.56 (0.64)	1.22 (0.58)	1.39 (0.76)	1.18 (1.02)	0.18 (0.38)	1.51 (0.50)	-0.04 (0.44)	1.36 (0.51)	863 (140.3)	18 (3.8)
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltl. & Cham	361	44.20 (41.04)	2 845.73 (357.95)	1.77 (1.22)	1.01 (0.41)	1.62 (0.71)	1.56 (0.90)	1.28 (0.66)	1.30 (0.77)	1.39 (1.04)	0.33 (0.59)	1.76 (0.45)	-0.20 (0.61)	1.35 (0.65)	897 (180.3)	17 (3.6)
<i>Pinus pseudostrabus</i> Lindl.	107	55.70 (40.69)	2 571.82 (550.27)	2.47 (1.18)	1.32 (0.81)	2.02 (0.69)	1.32 (0.54)	0.87 (0.44)	1.47 (0.68)	1.01 (1.00)	0.40 (0.49)	1.82 (0.38)	-0.41 (0.44)	1.50 (0.69)	903 (120.2)	18 (4.1)

Sup = Supervivencia; Alt = Altitud; TipVeg = Tipo de vegetación; CobArb = Cobertura arbórea; Text = Textura del suelo; Ero = Erosión; Pend = Pendiente; ProfSuelo = Profundidad del Suelo; Ped = Pedregosidad; ProtPlant = Protección de la Plantación; Fisio = Fisiografía; Exp = Exposición; MatOrg = Materia Orgánica; PP = Precipitación; T = Temperatura.

Valores en paréntesis son desviaciones estándar.

La mayor parte de las plantaciones se establecieron en lugares con pastizal y arbustos con densidades muy bajas de cobertura arbórea; solo *Pinus pseudostrobus* se estableció en áreas de pastizal y arbolado con densidades de bajas a media. Los suelos, en su mayoría, presentan texturas de fina a mediana. Solo las de *P. pseudostrobus* y *P. montezumae* tuvieron texturas más gruesas.

Factores que contribuyen a la supervivencia de las especies

El efecto de cada factor ambiental en la supervivencia difiere con la especie (Cuadro 4). El tipo de vegetación (TipVeg) existente en el lugar de plantación parece tener, consistentemente, una relación positiva (lineal) con la supervivencia; mayor presencia de vegetación natural con buena cobertura mejora la supervivencia (efecto de protección del renuevo). En el mismo caso está la fisiografía (Fisio); sitios en condiciones de fisiografía irregular presentaron mejor supervivencia.



Cuadro 4. Correlación supervivencia vs factores ambientales.

Especie	Alt	Tip Veg	Cob Arb	Text	Ero	Pend	Prof Suelo	Ped	Prot Plant	Fisio	Exp	Mat Org	PP	T
<i>Cupressus lindleyi</i> Klotzsch ex Endl.	0.183	0.153	0.199	-0.012	-0.209	-0.169	-0.111	-0.327	-0.316	0.362	-0.144	-0.066	0.080	-0.015
<i>Pinus ayacahuite</i> Ehrenb. ex Schltldl.	-0.062	0.140	0.204	0.188	-0.176	0.069	0.338	-0.263	-0.114	0.222	0.212	0.344	-0.097	-0.020
<i>Pinus greggii</i> Engelm. ex Parl.	0.041	0.151	0.165	-0.061	-0.135	-0.180	0.025	-0.220	0.079	0.033	-0.210	-0.126	0.056	-0.041
<i>Pinus michoacana</i> Mart.	-0.420	0.090	-0.022	-0.073	0.174	-0.078	-0.018	-0.351	-0.240	0.101	0.265	0.023	-0.011	-0.138
<i>Pinus montezumae</i> Lamb.	-0.334	0.224	0.032	0.038	-0.029	0.253	0.173	-0.163	0.233	0.324	-0.198	0.147	-0.240	0.034
<i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltldl. & Cham	0.159	-0.067	-0.239	-0.310	-0.147	-0.340	-0.040	-0.319	0.019	0.024	-0.247	-0.111	0.032	0.070
<i>Pinus pseudostrobus</i> Lindl.	0.506	0.477	0.230	-0.248	-0.345	-0.238	0.131	-0.368	0.264	-0.377	-0.427	0.398	0.260	0.090

Alt = Altitud; TipVeg = Tipo de vegetación; CobArb = Cobertura arbórea; Text = Textura del suelo; Ero = Erosión; Pend = Pendiente; ProfSuelo = Profundidad del Suelo; Ped = Pedregosidad; ProtPlant = Protección de la Plantación; Fisio = Fisiografía; Exp = Exposición; MatOrg = Materia Orgánica; PP = Precipitación; T = Temperatura.

Los mejores ajustes del modelo (1) para las especies evaluadas se muestran en el Cuadro 5. El comportamiento general de los diferentes factores probados respecto de la supervivencia mostró lo siguiente:

- Los ajustes tienen un bajo poder predictivo, aunque los estimadores relacionados a las variables de mayor impacto en la supervivencia de cada especie presentaron significancia estadística.
- No hay diferencia regional en supervivencia de las especies evaluadas: las variables relacionadas a las regiones son no-significativas.
- Las variables Precipitación, Temperatura media, Pedregosidad, Cobertura arbolada, Protección a la plantación, y Contenido de Materia Orgánica no mostraron relación estadísticamente significativa con la supervivencia con el modelo *Probit*.
- Existe un efecto negativo de la altitud sobre la supervivencia para especies que se establecieron fuera de su intervalo altitudinal natural.
- La mayor cobertura natural en el lugar de plantación tiene efecto positivo en la supervivencia.
- La mayor erosión en el sitio de plantación tiene efecto negativo en la supervivencia de la mayoría de las especies. Este efecto se revierte en sitios con más profundidad del suelo.
- La fisiografía en lomeríos favorece la supervivencia de algunas especies.
- La exposición de la plantación está estrechamente vinculada a la tolerancia a la sombra de las especies; las tolerantes muestran mejor supervivencia en exposiciones sombreadas.

Cuadro 5. Mejores ajustes al modelo *Probit* de supervivencia.

Especie	<i>Cupressus lindleyi</i>	<i>Pinus ayacahuite</i>	<i>Pinus greggii</i>	<i>Pinus michoacana</i>	<i>Pinus montezumae</i>	<i>Pinus patula</i>	<i>Pinus pseudostrobus</i>
Altitud	0.001*** (0.000)	-0.001*** (0.000)		-0.003*** (0.001)		0.001*** (0.000)	0.003*** (0.001)
Tipo de Vegetación	0.129*** (0.447)	0.147*** (0.069)					
Textura del suelo	0.200*** (0.069)	0.463*** (0.161)			-0.708*** (0.244)	-0.686*** (0.119)	-1.400*** (0.353)
Erosión	0.132*** (0.051)	-1.010*** (0.240)	-0.162*** (0.075)	-0.857*** (0.353)	0.610*** (0.192)		
Pendiente			-0.404*** (0.154)		0.377** (0.194)	-0.663*** (0.124)	-1.889*** (0.631)
Profundidad del Suelo				0.545* (0.330)	0.410*** (0.155)		1.765*** (0.737)
Fisiografía			0.565*** (0.176)	1.280*** (0.469)		0.807*** (0.174)	
Exposición	-0.330*** (0.105)	0.423*** (0.136)	-0.478*** (0.159)	4.240*** (1.783)		-0.457*** (0.125)	
Región I	-1.955*** (0.425)	2.231*** (0.822)	-0.153 NS (0.257)	6.139*** (3.029)	2.713*** (0.868)	-1.842*** (0.766)	-4.295*** (2.071)
Log Verosimilitud	-543.140	-150.555	-212.082	-53.166	-142.036	-185.470	-30.910
Prob > χ^2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Pseudo R ²	0.050	0.090	0.071	0.187	0.128	0.229	0.457
Núm. observaciones	889	250	330	99	235	361	107

Valores entre paréntesis corresponden a errores estándar del estimador. Considerar significancia de acuerdo con:

***p<0.01; **p<0.05; *p<0.1; NS = No significativo.

Los resultados a nivel de especie (Cuadro 5) evidenciaron lo siguiente:

Cupressus lindleyi: la supervivencia es ligeramente mejor en mayores altitudes, en sitios con más cobertura natural, con texturas de suelo más gruesas y exposiciones más secas; resultados similares a los registrados en otras regiones (Luoga *et al.* 1994). Curiosamente, la supervivencia es mejor en sitios con mayor erosión que en sitios con mejor condición de suelo. Este último resultado puede asociarse a la mayor cantidad de sitios erosionados plantados con este taxón (Cuadro 3).

Pinus ayacahuite: la supervivencia mejora cuando la especie se planta a menores alturas dentro de su intervalo altitudinal natural (1 600–3 600 m), en lugares con ligera cobertura vegetal, suelos con texturas gruesas, poco erosionados, y en sitios con exposiciones sombreadas. Sitios que coinciden con los requerimientos de la especie (aunque se observa una alta variación) citados por varios autores (Farfán *et al.*, 2002); no obstante, la supervivencia estimada fue muy baja.

Pinus greggii: esta especie y *Cupressus lindleyi* fueron establecidas en los sitios de menor calidad (suelo, erosión y mayor intervalo altitudinal). El hábitat natural del taxón se caracteriza por ser sitios con altitudes de 1 300 hasta 3 100 m, suelos delgados, pedregosos y normalmente pobres en materia orgánica (Flores *et al.*, 2011b), y cuya supervivencia en condiciones fuera de su área de distribución es sobresaliente (Gómez-Romero, *et al.*, 2012). Sin embargo, los resultados mostraron baja sobrevivencia, comparada con otros sitios en México donde ha sido registrado con un valor superior a 50 % (Muñoz *et al.*, 2012). En el presente estudio evidenció que la supervivencia mejora sustancialmente en sitios con baja erosión, poca pendiente, fisiografía de plana a lomeríos y con exposiciones secas.

Pinus michoacana: la supervivencia mejora en plantaciones establecidas a menores alturas dentro de su intervalo altitudinal natural (1 500-2 500 m), en localidades con menor erosión, mayor profundidad de suelo, fisiografía de plana a ondulada y exposiciones sombreadas. La supervivencia más alta se presentó a menor altitud; la cual está

probablemente vinculada a la mayor temperatura, variable con enorme impacto en la supervivencia de la especie en Michoacán, en particular con abundante humedad (Cázarez, 2017). No obstante, la supervivencia estimada es inferior a la señalada en otras evaluaciones de plantaciones (Gómez-Romero *et al.*, 2012; Cázarez, 2017).

Pinus montezumae: la supervivencia fue favorecida en suelos con texturas más arcillosas, menor erosión, pendientes moderadas y suelos profundos. La supervivencia observada está dentro del límite de confianza indicado por otros autores (Barrera *et al.*, 2018). La exposición no resultó tener significancia en la sobrevivencia, como lo documentaron Robles *et al.* (2017).

Pinus patula: la supervivencia mejora a mayores alturas dentro del intervalo en que fue plantada (2 100-3 500 msnm), en sitios con texturas arcillosas y poca pendiente, con fisiografía en lomeríos y con buena exposición al sol. Sin embargo, fue notablemente inferior a la supervivencia lograda en plantaciones dentro de su hábitat natural y con tratamientos de acondicionamiento del sitio (Sosa-Pérez y Rodríguez-Trejo, 2003).

Pinus pseudostrobus: la supervivencia mejora a mayores alturas dentro del intervalo en que fue plantada (1 400–3 500 msnm); resultado consistente con los de Flores *et al.* (2011b), quienes consignan que la especie tiene mejor supervivencia en altitudes entre 2 200 y 3 000 m. De igual forma, la supervivencia aumenta en sitios con texturas arcillosas, profundos y de poca pendiente, como lo señalan por Flores *et al.* (2011b). Resalta que el porcentaje de supervivencia estimado es similar al registrado en plantaciones del estado de Michoacán (Gómez-Romero *et al.*, 2012; Sigala *et al.*, 2015; Barrera *et al.*, 2018; Muñoz-Flores *et al.*, 2019).



Discusión

El análisis evidenció que las variables como Protección a la plantación y Cobertura arbolada tienen amplia variación, lo cual provocó que se dificultara la convergencia en la estimación de los parámetros del modelo *Probit* que incluye estas variables. Todos los modelos que se presentan en el Cuadro 5 lograron convergencia, significancia estadística aceptable y buena calidad de estimadores. No obstante, los ajustes solo es posible usarlos para caracterizar las relaciones entre las variables ambientales y la supervivencia; dado que los ajustes carecen de un buen nivel predictivo, muy probablemente derivado de la existencia de un conjunto de variables no observables como calidad, manejo de planta, así como método y fecha de establecimiento, que pudieron tener un impacto en el establecimiento de las plantaciones; fundamentalmente, en especies como *Pinus greggii* y *P. patula*.

Las variables Precipitación, Temperatura media, Pedregosidad, Cobertura arbolada, Protección a la plantación, y Contenido de Materia Orgánica no fueron significativas, a pesar de que se consideran esenciales para el establecimiento de la plantación. Lo anterior es atribuible a la poca variación de estas dentro de las plantaciones evaluadas (Cuadro 3), y a que variables como la Altitud parecen funcionar como *proxy* regional de la Temperatura y la Precipitación.

Los resultados evidencian que la variable Protección de la plantación es tan escasa que no tiene efecto en el desempeño de la plantación.

La Pendiente tuvo un signo negativo en algunas especies, lo cual parecería ilógico; sin embargo, es un reflejo del fuerte efecto del cambio inmediato de uso de suelo de las plantaciones forestales recién establecidas a uso agrícola, como ha sido extensamente documentado por varios autores (Mexal *et al.*, 2008; Burney *et al.*, 2015). La relación muestra que los terrenos con bajas pendientes son más deseables para el cambio de uso, por lo que se logran mejores tasas de supervivencia en terrenos de mayor pendiente y de fisiografía en lomeríos.

La variable Cobertura arbolada no fue significativa, muy probablemente por su alta correlación con el tipo de vegetación, que resultó significativo en el desempeño de las especies tolerantes a la sombra. Un efecto de correlación similar se observó con la variable contenido de materia orgánica, la cual se relaciona de manera directa con la profundidad del suelo y de manera indirecta con la erosión y la pendiente.

La variable tipo de vegetación registró un efecto positivo importante en la supervivencia de *Cupressus lindleyi* y de *P. ayacahuite*, esto sugiere que al haber una mayor presencia de otras especies herbáceas o arbustivas (de acuerdo con los resultados) se observa una mejora en supervivencia. El efecto ha sido documentado por otros autores, en términos de protección a los brinzales (Espinosa *et al.*, 2008), o al posible efecto de planta nodriza que pueden tener algunos arbustos o herbáceas (Ramírez-Contreras y Rodríguez-Trejo, 2009).

Las variables dicotómicas relacionadas con las diferencias regionales no presentaron significancia estadística; ello indica que la supervivencia es independiente de la región. Si se considera que las regiones también poseen una diversidad de condiciones de sitio, entonces la probable fuente de variación no controlada parecería no ser diferente entre las distintas regiones de la entidad. Esta hipótesis, implícitamente, sugiere que el mal desempeño en supervivencia de las plantaciones evaluadas puede atribuirse tanto a la mala calidad de planta, como a problemas en la selección de los sitios de plantación y el método y fecha de plantación (variables ausentes en el análisis). Los dos últimos factores advierten la limitada compatibilidad que existe entre los requerimientos de las especies y las características de los sitios de plantación; lo cual resulta muy evidente en la caracterización de las variables ambientales y en la evaluación de la supervivencia mediante el modelo *Probit*.

Esta hipótesis resalta la importancia de que las evaluaciones de plantaciones incorporen algún o algunos indicadores tanto de calidad de planta (i.e. calibre del tallo, altura de la planta, características de la raíz, cantidad de micorrizas) y el método de plantación, como de las características de transporte y manejo de las plántulas en campo (i.e. embarque, tipo de

transporte, desembarque); dado que estas variables tienen impacto en el desempeño de las plantaciones. Ejemplos de esas consideraciones son los trabajos de Muñoz *et al.* (2013), Robles *et al.* (2017) y Prieto *et al.* (2018). La integración de estas, como variables de control en un análisis de supervivencia o crecimiento mejora la discriminación de los diferentes efectos de las variables ambientales y de manejo posterior a la plantación (protección de la plantación).

El monitoreo de toda la cadena de producción en el establecimiento de una plantación es fundamental en la agenda de las buenas prácticas de establecimiento. Sin embargo, se requiere de la generación de capacidades entre los diferentes actores que intervienen en el proceso y elaboración de protocolos de monitoreo y reporte, desde la colecta / producción de semilla, producción de planta, transporte de planta, hasta el establecimiento de la plantación (fecha y método de plantación) y su manejo. Estos diferentes actores deben proporcionar la información suficiente para que las plantaciones establecidas puedan considerarse en un futuro como verdaderos experimentos naturales útiles para evaluar el desempeño de las diferentes especies en distintas condiciones de sitio. Ese tipo de protocolos se hará más importante en el futuro cercano, en la medida que sea necesaria más y mejor información para evaluar la adaptación de especies en presencia del cambio climático (Galicia, 2017), así como de cambios en los ciclos de nutrientes y modificaciones drásticas en los suelos.

Conclusiones

Los resultados muestran que las plantaciones tienen una baja supervivencia (38 %), fundamentalmente, atribuible a la baja protección de las plantaciones y la rápida conversión a terreno agropecuario. No existen diferencias por región que podrían vincularse a diferencias en calidad de planta proveniente de diferentes viveros. Sin embargo, es notoria la falta de asociación entre los requerimientos básicos de la especie en términos de intervalo altitudinal, tolerancia a la sombra, tipo y profundidad de suelo, fisiografía y cuidado de la plantación, y los sitios elegidos para plantarlas.

El éxito de futuras acciones de restauración demandará información actualizada, pertinente y basada en evidencia, para aplicar no solo instrumentos adecuados de política pública que coadyuven a mejorar los resultados de los programas de restauración forestal, sino de información técnica básica proveniente de estudios de evaluación del desempeño de las plantaciones que relacione los requerimientos de las plántulas de cada especie en campo, con las características de los sitios de plantación.

Agradecimientos

Se agradece al equipo de trabajo de Protectora de Bosques del Estado de México y del INIFAP, Campo Experimental Valle de México que brindaron apoyo logístico para el levantamiento de información; así como al Dr. Octavio Magaña Torres quien coordinó todo el trabajo de campo, captura de información y análisis preliminar.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener algún conflicto de intereses.

Referencias

Arteaga-Martínez, B. 2000. Evaluación dasométrica de plantaciones de cuatro especies de pinos en Ayotoxtla, Guerrero. Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 6(2): 151-157.

<https://revistas.chapingo.mx/forestales/?section=articles&subsec=issues&numero=22>
(6 de junio de 2020).

- Barrera R., R., R. López A. and J. Muñoz F. 2018. Survival and growth of *Pinus pseudostrobus* Lindl. and *Pinus montezumae* Lamb. on different planting dates. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(50): 323-341. Doi:10.29298/rmcf.v9i50.245.
- Burney, O., A. Aldrete, A., R. Álvarez R., J. A. Prieto R., J. R. Sánchez V. and J. G. Mexal. 2015. México—Addressing challenges to reforestation. *Journal of Forestry* 113(4): 404- 413. Doi:10.5849/jof.14-007.
- Capó A., M. Á. and M. Newton. 1991. Survival and growth of five species of *Pinus* seedlings after different approaches to competition control: bridging studies between Oregon and Mexico. *New Forests* 5:219-238. Doi:10.1007/BF00028113.
- Capó A., M. Á. 2001. Establecimiento de plantaciones forestales: Los ingredientes del éxito. Dpto Forestal, UAAAN. Saltillo, Coah. México. 207 p.
- Carabias, J., V. Arriaga y V. C. Gutiérrez. 2007. Las políticas públicas de la restauración ambiental en México: limitantes, avances, rezagos y retos. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* (80): 85-100. Doi:10.17129/botsci.1759.
- Cázar, M. R. 2017. Afforestation with the Purpose of Restoring the Protected Natural Area "Cerro del Punhuato", Morelia, Michoacán. *Modern Environmental Science and Engineering* 3(9):653-660. Doi: 10.15341/mese(2333-2581)/09.03.2017/006.
- Contreras, A. R. y D. A. Rodríguez T. 2004. Efecto de calidad de planta, exposición y micrositio en una plantación de *Quercus rugosa*. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 10(1):5-11.
<https://www.redalyc.org/pdf/629/62910101.pdf> (17 de agosto de 2020).

Espinosa, U., J. F. Sánchez, L. G. Ramírez y R. I. Sánchez. 2008. Reforestación con especies nativas: el caso del mirador Estribo Chico, Pátzcuaro, Mich. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2):248-255.

<http://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/131> (5 de junio de 2020).

Farfán V., E. G., J. Jasso M., J. López U., J. Vargas H. y C. Ramírez H. 2002. Parámetros genéticos y eficiencia de la selección temprana en *Pinus ayacahuite* Ehren. var. *ayacahuite*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(3): 239-246.

<https://www.redalyc.org/pdf/610/61025302.pdf> (15 de junio de 2020).

Galicia, L. 2017. Tropical and highland temperate forest plantations in Mexico: pathways for climate change mitigation and ecosystem services delivery. *Forests* 8(12): 489. Doi:10.3390/f8120489.

Gómez-Romero, M., J. C. Soto-Correa, J. A. Blanco-García, C. Sáenz-Romero, J. Villegas y R. Lindig-Cisneros. 2012. Estudio de especies de pino para restauración de sitios degradados. *Agrociencia* 46(8): 795-807.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v46n8/v46n8a5.pdf> (27 de julio de 2020).

Luoga, E. J., Chamshama, S. A. O. and S. Iddi. 1994. Survival, Growth, Yield and Wood Quality of a Species and Provenance Trial of *Cupressus lusitanica*, *Cupressus lindleyi* and *Cupressus benthamii* at Hambalawei, Lushoto, Tanzania. *Silvae genetica* 43(4):190-195.

http://www.sauerlaender-verlag.com/CMS/fileadmin/content/dokument/archiv/silvaegenetica/43_1994/43-4-190.pdf (12 de agosto de 2020).

Maddala, G. S. 1986. Limited-dependent and qualitative variables in econometrics. Vol. 3. Cambridge University Press. Cambridge, UK. 423 p.

Mexal, J. G., R. A. Cuevas R., P. Negreros-Castillo and P. Paraguirre L. 2002. Nursery production practices affect survival and growth of tropical hardwoods in Quintana Roo, Mexico. *Forest Ecology and Management* 168(1-3):125-133. Doi:10.1016/S0378-1127(01)00735-6.

Mexal, J. G., R. A. Cuevas R. and T. D. Landis. 2008. Reforestation success in central Mexico: factors determining survival and early growth. *Tree planters' notes* 53(1):16-21. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301607143> (12 de julio de 2020).

Montero S., F. M., J. I. Valdez Hernández, H. M. de los Santos P., V. M. Cetina A. y L.R. Sánchez V. 2011. Crecimiento inicial de especies arbóreas multipropósito en un terreno ganadero del norte de Veracruz. *Revista mexicana de ciencias forestales* 2(3): 53-68. Doi: 10.29298/rmcf.v2i3.631.

Muñoz, H. J., V. M. Coria Á., J. J. García S. y M. Balam C. 2009. Evaluación de una plantación de tres especies tropicales de rápido crecimiento en Nuevo Urecho, Mich. *Ciencia forestal en México* 34(106): 61-87. <http://www.scielo.org.mx/pdf/cfm/v34n106/v34n106a4.pdf> (15 de julio de 2020).

Muñoz F., H. J., G. Orozco G., V. M. Coria A., J. J. García S., Y Muñoz V. y G. S. Cruz, 2011a. Evaluación de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. con dos densidades de plantación en Michoacán, México. *Foresta Veracruzana* 13(1):29-35. <https://www.redalyc.org/pdf/497/49719786005.pdf> (18 de julio de 2020).

Muñoz F., H. J., J. T. Sáenz R., J. J. García S., E. Hernández M. y J. A. Contreras. 2011b. Áreas potenciales para establecer plantaciones forestales comerciales de *Pinus pseudostrobus* Lindl. y *Pinus greggii* Engelm. en Michoacán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(5):29-44. Doi: 10.29298/rmcf.v2i5.585.

Muñoz F., H. J., V. M. Coria A., J. J. García S., E. Velasco B. y G. Martínez M. 2012. Evaluación de una plantación de *Pinus greggii* Engelm. con dos espaciamientos. Revista mexicana de ciencias forestales 3(11): 57-70. Doi: 10.29298/rmcf.v3i11.517.

Muñoz F., H. J., J. J. García M., G. Orozco G., V. M. Coria Á. y M. B. Nájera-Rincón, M. B. 2013. Evaluación de una plantación con dos especies tropicales cultivadas en diferentes tipos de envases. Revista mexicana de ciencias forestales 4(18): 28-43. Doi: 10.29298/rmcf.v4i18.387.

Muñoz-Flores, H. J., J. T. Sáenz-Reyes, R. Barrera-Ramírez, J. Hernández-Ramos, J. J. García-Magaña and D. Castillo-Quiroz. 2019. Planting dates and their influence on the development of *Pinus pseudostrobus* Lindl., in Michoacán, Mexico. Revista Bio Ciencias 6: e524. Doi:10.15741/revbio.06.e524.

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 Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N.L., México. 131 p.

Prieto R., J. A., J. T. Sáenz R., M. Alarcón B., A. Rueda S. y J. D. Benavides S. 2011. Indicadores de calidad de planta en viveros forestales de la Sierra Madre Occidental. Capítulo II Materiales y Métodos. Campo Experimental Valle del Guadiana CIRNOC, INIFAP. Libro técnico Núm. 3. Durango, Dgo., México. pp. 23-30.

Prieto R., J. Á., A. Duarte S., J. R. Goche T., M. M. González O. y M. A. Pulgarín G. 2018. Supervivencia y crecimiento de dos especies forestales, con base en la morfología inicial al plantarse. Revista mexicana de ciencias forestales 9(47): 151-168. Doi:10.29298/rmcf.v9i47.182.

Ramírez-Contreras, A. y D.A. Rodríguez-Trejo. 2009. Plantas nodriza en la reforestación con *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente 15(1): 43-48.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n1/v15n1a5.pdf> (5 de junio de 2020).

Robles V., F., D. A. Rodríguez T. and A. Villanueva M. 2017. Plant quality and survival in *Pinus montezumae* Lamb. Reforestation. Revista mexicana de Ciencias Forestales 8(42): 55-76. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v8n42/2007-1132-remcf-8-42-00055-en.pdf> (6 de junio de 2020).

Román D., F., S. Levy T., H. Perales R., N. Ramírez M., D. Douterlungne y S. López M. 2007. Establecimiento de seis especies arbóreas nativas en un pastizal degradado en la selva lacandona, Chiapas, México. Ecología Aplicada 6(1-2): 1-8. <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v6n1-2/a01v6n1-2.pdf> (6 de junio de 2020).

Sarukhán, J., T. Urquiza-Haas, P. Koleff, J. Carabias, R. Dirzo, E. Ezcurra, S. Cerdeira-Estrada and J. Soberón. 2014. Strategic actions to value, conserve, and restore the natural capital of megadiversity countries: the case of Mexico. BioScience 65(2): 164-173. Doi:10.1093/biosci/biu195.

Sigala, R., T. González and R. Prieto. 2015. Survival of *Pinus pseudostrobus* Lindl. plantations in terms of the production system and pre-conditioning in the nursery. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 6(30): 20-30.

https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Pinus+ayacahuite+plantation+survival&btnG= (16 de julio de 2020).

Sosa-Pérez, G. y D. A. Rodríguez-Trejo. 2003. Efecto de la calidad de planta en la supervivencia y crecimiento de *Pinus patula* en un área quemada. Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 9(1): 34-43.

<https://www.redalyc.org/pdf/629/62990104.pdf> (14 de junio de 2020).

Yam-Chin, C., P. Montañez-Escalante y R. Ruenes-Morales. 2014. Crecimiento de plantas jóvenes de *Cordia dodecandra* (Boraginaceae) en tres etapas sucesionales de vegetación en Calotmul, Yucatán. Revista mexicana de biodiversidad 85(2): 589-597. Doi:10.7550/rmb.34996.



Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales** –sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia **Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional)**, que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.