

## Fertilización y asociación con especies pioneras herbáceas en el crecimiento de *Pinus pseudostrobus*

### Fertilization and association with pioneer herbaceous species on the performance of *Pinus pseudostrobus*

Gómez-Romero M<sup>1</sup>, E de la Barrera<sup>2</sup>, J Villegas<sup>3</sup>, R Lindig-Cisneros<sup>4</sup>

**Resumen.** En condiciones severas de degradación, como la que presentan muchos acrisoles, se debe de establecer el papel de las interacciones planta-planta en su supervivencia y crecimiento. Se realizó un experimento con sustrato obtenido de un sitio erosionado (acrisoles con presencia de cárcavas) en condiciones de invernáculo. El mismo se cubrió con una con malla de sombra del 30%, para evaluar el efecto de la fertilización y la asociación con especies herbáceas pioneras en el crecimiento y supervivencia de *P. pseudostrobus*. Se utilizaron las herbáceas pioneras *Lupinus mexicanus* y *Tithonia tubiformis* en tres tratamientos experimentales y un control. Para la fertilización, se utilizaron cuatro concentraciones de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . La combinación de ambos factores generó 16 tratamientos. Los resultados indicaron que hubo diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos de presencia de herbáceas pioneras ( $p \leq 0,01$ ). La especie que incrementó significativamente el crecimiento y supervivencia del pino fue la leguminosa *Lupinus mexicanus*; en su presencia los pinos presentaron una mayor supervivencia que los pinos control (98% versus 78%). Los tratamientos de fertilización no tuvieron efecto en la supervivencia o el crecimiento de *P. pseudostrobus*. Los resultados sugieren que en acrisoles degradados se requiere restablecer interacciones bióticas para mejorar el desempeño de especies arbóreas.

**Palabras clave:** *Lupinus*; Erosión; Sotobosque; Restauración ecológica; Fósforo.

**Abstract.** When degradation is severe, as it is often the case on acrisols, it is necessary to test the effect of plant-plant interactions in their survival and growth. An experiment was conducted, with substrate from an eroded site (acrisols with gullies) in a shaded greenhouse (30% shade) to evaluate the effect of fertilization and the presence of pioneer herbaceous species in the performance of *Pinus pseudostrobus*. The pioneer species *Lupinus mexicanus* and *Tithonia tubiformis* were used in three experimental treatments and a control. To fertilize,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  was applied in four concentration levels. There were a total of 16 treatment combinations when considering both factors. Results showed significant differences ( $p \leq 0.01$ ) among the treatments of presence of pioneer herbaceous species. The species that was more influential in pine performance was the legume *Lupinus mexicanus*; when it was present, the pines had a higher survival (98%) than pines under control conditions (78%), being the difference statistically significant. Fertilization had no effect neither in the survival nor the performance of *P. pseudostrobus*. These results suggest that in these soils, reestablishing biotic interactions is necessary for improving the performance of tree species.

**Keywords:** *Lupinus*; Erosion; Understory; Ecological restoration; Phosphorus.

<sup>1</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Doctorado Institucional en Ciencias Biológicas, Morelia, Michoacán, México.

<sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Laboratorio de Ecofisiología Ambiental, Morelia, Michoacán, México.

<sup>3</sup> Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico Biológicas, Morelia, Michoacán, México.

<sup>4</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Laboratorio de Ecología de Restauración, Morelia, Michoacán, México.

Address Correspondence to: Mariela Gómez-Romero, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico-Biológicas, Edificio B-3, Ciudad Universitaria, Avenida Francisco J. Mujica S/N, Felicitas del Río, Morelia, Michoacán, C.P. 58030, México Tel.: 443 326 5788 Fax: 443 326 5788, e-mail: margrbio13@hotmail.com  
Recibido / Received 4.IX.2012. Aceptado / Accepted 5.X.2012.

## INTRODUCCIÓN

La erosión es el resultado de perturbaciones naturales o es causada por acciones humanas como el cultivo intensivo, el pastoreo excesivo y la deforestación (Nebel et al., 1999). El agua erosiona el suelo tanto por el impacto de las gotas de lluvia como por la fricción del escurrimiento superficial (Medina, 2002). La lluvia que cae sobre un terreno descubierto golpea directamente sobre su superficie, eliminando la materia orgánica ligera, fragmentando los agregados del suelo. Cuando se forman corrientes como consecuencia del escurrimiento, éstas van subcavando el suelo y forman surcos llamados cárcavas. La presencia de estas cárcavas en un terreno indica un grado avanzado de degradación (Tyler, 1994). Por otro lado, se sabe que los suelos protegidos por vegetación mantienen su integridad, y la vegetación minimiza la acción del viento y dispersa las gotas de lluvia, reduciendo la fuerza erosiva. Por lo tanto, la cobertura del suelo con vegetación contribuye a la conservación y formación del mismo (Smith et al., 2000; Ruiz-Reyes et al., 2000; Acevedo-Sandoval et al., 2003). La presencia de árboles y arbustos permite una mayor diversidad estructural en los ecosistemas, y además de ofrecer protección contra la erosión del suelo, crea regímenes locales favorables de temperatura y humedad, permite la reposición constante de materia orgánica del suelo y son albergue para gran cantidad de especies de fauna (Suárez-Pérez et al., 2012). Las poblaciones de *P. pseudostrubus* han sido muy afectadas por la deforestación a todo el largo de su rango de distribución en México. La recuperación de esta especie es difícil en sitios degradados porque es poco resistente al estrés por sequía. Por otro lado, dicha especie es muy valiosa para los pobladores locales porque en sitios apropiados presenta elevadas tasas de crecimiento y la madera es de buena calidad (Rzedowski, 1978; López-Upton, 2002). Por lo tanto, es necesario establecer bajo que condiciones se puede favorecer su desempeño, entendido como supervivencia y crecimiento, en sitios degradados.

En este sentido, las interacciones entre plantas influyen mucho la estructura y dinámica del ecosistema y son responsables de la presencia o ausencia de determinadas especies (Padilla y Pugnaire, 2006). En las últimas décadas se ha reconocido el papel determinante de la facilitación como una interacción positiva que afecta directamente el crecimiento, distribución y metabolismo de las especies (Bruno et al., 2003). Aún cuando las interacciones negativas como alelopatía o competencia han sido temas centrales en el estudio de la ecología y evolución, es claro también que los organismos pueden mejorar el desarrollo de sus vecinos al modificar el ambiente, de forma que los beneficie por diversos mecanismos (Callaway, 2007). Se ha documentado que algunas especies arbustivas, pueden funcionar como nodrizas de especies arbóreas facilitando su establecimiento más que compitiendo por recurso o espacio. *Lupinus elegans* puede facilitar el establecimiento de coníferas como *Pinus montezumae* y *Abies religiosa* (Blanco García et al., 2011).

Bajo condiciones severas de degradación, se requiere de la implementación de técnicas de restauración para recuperar la vegetación y en consecuencia reducir la erosión de los suelos y propiciar su recuperación. Las especies pioneras y del sotobosque son de particular importancia para la restauración ecológica, especialmente las leguminosas, por su gran capacidad de fijar nitrógeno (Lindig-Cisneros et al., 2002). Por ejemplo, *Lupinus mexicanus* presenta características para contribuir a la restauración de sitios degradados; varias especies de este género han sido utilizadas con estos fines (Ávila y Vargas, 2009; Blanco-García et al., 2011). En la gran mayoría de las superficies muy alteradas no es posible restaurar la vegetación original, pero es posible inducir el desarrollo de una vegetación protectora que permita conservar e incrementar la fertilidad del suelo (Vázquez-Yanes et al., 1999). La adición de fertilizantes permite regresar al suelo al menos una mínima parte de los nutrientes perdidos. Además, las plantas sometidas a estrés por deficiencias nutricionales, tienden a perder capacidad fotosintética y disminuir el contenido de clorofila de sus hojas (Carter y Knapp, 2001). En estos términos, el papel del fósforo es fundamental en la dinámica de los ecosistemas terrestres (Oberson et al., 2001; Vitousek, 2004), en los procesos sucesionales, y en aquellos que determinan la productividad de los ecosistemas (Tamm, 1991; Vitousek y Howarth, 1991). La disponibilidad de fósforo es muy importante para el establecimiento inicial de la vegetación (Oliet et al., 2005) y posterior desempeño de las plantas (Mc Grath et al., 2001). Por lo tanto, la adición de nutrientes ha sido una estrategia común en la restauración de sistemas ecológicos (Quoreshi y Timmer 2000, Oliet et al., 2005). Sin embargo, la aplicación de algunos métodos específicos de mejoramiento del suelo puede favorecer otro tipo de procesos de degradación. Por ejemplo, fertilizar con nitrógeno puede incrementar la acidez del suelo, favoreciendo así la reducción del fósforo disponible, lo que destaca la importancia de entender la química del suelo como un componente del ecosistema antes de aplicar métodos de restauración (García-Oliva, 2005).

Para evitar mayores daños en condiciones de campo, es una alternativa ensayar bajo condiciones controladas con modelos experimentales donde se puedan controlar las interacciones entre plantas y estudiar mecanismos como la facilitación. Con esta estrategia se decidió estudiar el efecto de dos especies herbáceas pioneras en el crecimiento y supervivencia de *Pinus pseudostrubus*.

*Lupinus mexicanus* Cerv. In Lag. (Fabaceae) y *Tithonia tubiformis* (Jacq.) Cass. (Asteraceae) son especies herbáceas pioneras que fueron seleccionadas para estudiar su efecto y el de la fertilización con fósforo en el crecimiento y supervivencia de *Pinus pseudostrubus* Lindl. Éstas herbáceas se caracterizan por encontrarse en sitios con algún grado de disturbio en bosques de pino y pino-encino en la región central de México. Se han realizado trabajos con *T. diversifolia* en sistemas sustentables de producción agropecuaria (Rivera, 2002), lo que sugiere que

especies de este género podrían tener un efecto positivo en el desempeño de especies arbóreas. Además, diversas especies de este género, se establecen en sitios altamente degradados y tienen la capacidad de tolerar la acidez de los suelos y la baja fertilidad (Reyes, 2006; Suárez-Pérez et al., 2012). *Tithonia tubiformis* es una especie prometedora que se encuentra en la región occidental de México (Rzedowski y Rzedowski, 2004).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la presencia de *Lupinus mexicanus* (Fabaceae), y *Tithonia tubiformis* (Asteraceae) de forma individual y en conjunto, así como la fertilización con fósforo, en el crecimiento y supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en un experimento de invernáculo. Esto permitiría contribuir al desarrollo de estrategias de restauración de la vegetación y conservación del suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se inició en marzo de 2008. Las semillas de pino se estratificaron en condiciones controladas, fueron esterilizadas previamente con hipoclorito de sodio al 20% (NaClO 1:5 H<sub>2</sub>O), y posteriormente se colocaron en cajas de Petri con papel filtro como sustrato humedecido con 2 mL de agua destilada. Las cajas fueron selladas con parafilm (R) y permanecieron durante 15 días a una temperatura de 4 °C. Una vez transcurrido este tiempo, se trasladaron a una cámara de crecimiento a una temperatura constante de 25 °C con 12 horas de luz, manteniendo la humedad durante el proceso de germinación que fue de 21 días. Después de este período de tiempo, se realizó el trasplante una vez que la radícula ya estaba emergida, en el sustrato previamente esterilizado en autoclave. Las plántulas fueron propagadas en contenedores rígidos de plástico (350 cm<sup>3</sup>), en condiciones de invernáculo cubierto con malla del 30% de sombra. Como sustrato se utilizó una mezcla comercial a base de fibra de coco, corteza y agrolita mezclado con arena en combinación 1:1 y esterilizado. A los tres meses de edad, los pinos fueron trasplantados a contenedores rígidos de plástico con capacidad de 4 litros con sustrato obtenido del sitio de estudio, que fue previamente homogeneizado. El sustrato se extrajo de un sitio conocido como Huertitas en el Ejido de Atécuaro (19° 33' 05" - 19° 37' 08" N, 101° 05' 07" O, 2275 m.s.n.m.), en el Municipio de Morelia, la capital del estado de Michoacán. Es un sitio deforestado que en su mayoría se encuentra desprovisto de vegetación, donde existen numerosas cárcavas y se encuentra severamente erosionado, con presencia de acrisoles (acrisol ócrico). Los análisis de suelo indican que el contenido de fósforo es extremadamente pobre (Tabla 1). La zona presenta un clima subhúmedo, con lluvias en verano, temperatura media anual de 13,8 °C y precipitación media anual de 1000 mm (Warner et al., 2007).

Se utilizaron dos especies herbáceas pioneras: *Lupinus mexicanus* y *Tithonia tubiformis*. *Lupinus mexicanus* es una leguminosa herbácea anual o bianual, de 20 a 60 cm de alto con hojas alternas, palmadamente compuestas, flores dispuestas en

racimos terminales de 10 a 30 cm de largo de color generalmente azules o azul-moradas, legumbre de 3 a 4 cm de largo, y es nativa de México (Calderón y Rzedowski, 2005). *Tithonia tubiformis* es una herbácea robusta, llega a medir hasta 4 m de alto, de tallos gruesos, con frecuencia áspera en algunas porciones por la presencia de pelos rígidos con hojas de disposición alterna, presenta flores individuales muy agrupadas en cabezuelas que semejan flores sencillas y llegan a medir hasta 15 cm de diámetro. Suele cubrir terrenos baldíos, parcelas de cultivo abandonadas, y es frecuente a lo largo de caminos o canales (Rzedowski y Rzedowski, 2004).

Las plantas se dispusieron en 160 contenedores. Todos ellos tuvieron una planta de *P. pseudostrobus*. Cuarenta contenedores tenían una planta de *L. mexicanus* (L); 40 una de *T. tubiformis* (T); 40 la combinación de ambas especies herbáceas (L+T) y los 40 restantes sin herbáceas (sólo *P. pseudostrobus*: control = C). Los contenedores fueron distribuidos en un diseño de 10 bloques completos, 16 plantas en cada bloque, 4 por cada tratamiento de asociación de herbáceas. Se decidió fertilizar con fosfato de potasio en un gradiente de fertilización con 4 dosis (control, baja, media y alta de P por contenedor), quedando así 16 tratamientos. Cada bloque quedó con una réplica de cada tratamiento, en total 10 réplicas por tratamiento (Tabla 2). Los bloques no tuvieron un acomodo específico de acuerdo a un gradiente de luz, ni de pendiente en el invernáculo. Las condiciones fueron muy similares entre los bloques de acuerdo a mediciones de PAR realizadas de manera rutinaria como parte del manejo de las instalaciones experimentales; sólo se separaron para tener el total de tratamientos representados en el grupo y prever pérdida de réplicas de algún tratamiento específico.

Las semillas de *L. mexicanus* recibieron un tratamiento pregerminativo de escarificación química mediante ácido sulfúrico concentrado (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) durante 20 minutos. Las semillas de *Tithonia tubiformis* no recibieron tratamiento pregerminativo.

Se mantuvo la presencia de una planta de la especie o especies pioneras (dependiendo del tratamiento), a través del sembrado directo en los contenedores. Para los tratamientos de fertilización, se aplicó un gradiente de fertilización: ausencia de fertilizante, dosis baja con 0,1 g de P, dosis media con 0,2 g de P y dosis alta con 0,4 g de P. La forma química de adición del fósforo fue KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. El fertilizante se disolvió en agua destilada, en diferente concentración de soluciones, una para cada tratamiento. Se fertilizó con 30 mL de solución por cada contenedor. En el caso del control, se adicionaron 30 mL de agua destilada. La fertilización se llevó a cabo semanalmente durante tres meses (julio-septiembre) por año durante dos años. El riego se mantuvo constante cada tercer día durante todo el experimento, con excepción de la época de lluvias en la que se suspendió el riego. El experimento tuvo una duración de dos años y 4 meses.

Para evaluar el crecimiento de los pinos, se registraron las variables de altura, diámetro a la altura de la base (DAB en

**Tabla 1.** Análisis físico y químico del sustrato utilizado en el experimento.**Table 1.** Physico-chemical analysis of the substrate used in the experiment.

Determinación		
<b>Análisis físico</b>	% arcilla	71,80
	% limo	16,00
	% arena	12,20
	Clasificación	Arcilloso
	Interpretación	Pesado
	Densidad aparente	1,20
	Capacidad de campo (C.C.)	43,16
	Punto de marchitez permanente (P.M.P.)	23,45
	% humedad aprovechable total	19,54
	% saturación	56
	% humedad aprovechable en función al % de saturación	10,64
	% humedad del suelo al momento del análisis	N.D.
	% humedad aprovechable de la humedad actual	N.D.
	Color Munsell seco	2,5 YR 3/6
	Color Munsell húmedo	2,5 YR 3/4
<b>Análisis químico</b>	pH H <sub>2</sub> O Q.P. 1:2	5,4
	Clasificación	Moderadamente ácido
	pH CaCl <sub>2</sub> 1:2	4,9
	Clasificación	Ácido
	C.E. milimohos	0,06
	Clasificación	No salino
	% M.O.	0,83
	Clasificación	Pobre
	Nitrógeno total orgánico kg/ha	20,88
	Clasificación	Pobre
	Nitrógeno aprovechable	8,40
	Clasificación	Muy pobre
	Fósforo kg/ha Bray	Trazas
	Clasificación	Extremadamente pobre
	Fosforo asimilable kg/ha	Trazas
	Clasificación	Extremadamente pobre
	Potasio kg/ha	92
	Clasificación	Muy pobre
	Potasio asimilable kg/ha	36,88
	Clasificación	Extremadamente pobre
Ca kg/ha	1148,00	
Clasificación	Muy pobre	
Mg kg/ha	133,00	
Clasificación	Medio	
C.I.C.	28,40	

**Tabla 2.** Tratamientos de fertilización y presencia de especies pioneras herbáceas en el desempeño de *Pinus pseudostrabus*.

**Table 2.** Fertilization treatments and presence of pioneer herbaceous species in the performance of *Pinus pseudostrabus*.

Tratamientos	Asociación con especies pioneras herbáceas	Fertilización (KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )
1.	<i>Lupinus mexicanus</i>	Control
2.	<i>Tithonia tibiformis</i>	Control
3.	<i>Lupinus mexicanus</i> + <i>Tithonia tibiformis</i>	Control
4.	Control	Control
5.	<i>Lupinus mexicanus</i>	Dosis baja (0,1 g P)
6.	<i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis baja (0,1 g P)
7.	<i>Lupinus mexicanus</i> + <i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis baja (0,1 gr P)
8.	Control	Dosis baja (0,1 g P)
9.	<i>Lupinus mexicanus</i>	Dosis media (0,2 g P)
10.	<i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis media (0,2 g P)
11.	<i>Lupinus mexicanus</i> + <i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis media (0,2 g P)
12.	Control	Dosis media (0,2 g P)
13.	<i>Lupinus mexicanus</i>	Dosis alta (0,4 g P)
14.	<i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis alta (0,4 g P)
15.	<i>Lupinus mexicanus</i> + <i>Tithonia tibiformis</i>	Dosis alta (0,4 g P)
16.	Control	Dosis alta (0,4 g P)

el cuello de la planta a un cm del suelo), cobertura (evaluado mediante la fórmula de la elipse  $r_1 r_2 \pi$  con dos radios de la copa para inferir el dosel), número de ramas, longitud de las ramas con hojas y supervivencia. La variable de longitud de ramas con hojas, se tomó como una alternativa para evaluar el área foliar, ya que debido a la estructura de los pinos resulta muy complicado cuantificar el número de acículas y su área. Esta variable se relaciona con el área fotosintética de la planta. Todas las variables fueron evaluadas a los 2 años y 4 meses. Al finalizar el experimento, se colectaron muestras de tejido (tres fascículos al azar del principio del tercio apical de cada planta) para realizar un análisis de clorofila por el método de Lichtenthaler (1987).

El modelo estadístico fue simplificado eliminando el factor bloque que no fue significativo siguiendo la metodología sugerida por varios autores (Underwood, 1997; Crowley, 2007; Sáenz-Romero et al., 2011). El análisis estadístico consistió en análisis de varianza (ANOVA) de dos vías considerando como factores: especie (1. *L. mexicanus*, 2. *T. tubiformis*, 3. *L. mexicanus* + *T. tubiformis* y 4. sin planta) y fertilización (1: Sin fertilizante; 2: dosis baja 0,1 g de P; 3: dosis media 0,2 g de P, y 4: dosis alta 0,4 g de P). Se evaluaron las variables de altura,

diámetro, cobertura, ramas y longitud de plantas con hojas; para la supervivencia se utilizó un Modelo Linear Generalizado (GLM) con distribución binomial. Se utilizó el paquete R (R Development Core Team, 2011).

## RESULTADOS

Los resultados indicaron que la adición de fosfato de potasio (KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>) no influyó de manera significativa en el crecimiento de *Pinus pseudostrabus* bajo las condiciones experimentales. Sin embargo, la presencia de la leguminosa *Lupinus mexicanus* determinó un mejor crecimiento del pino, y *Tithonia tubiformis* en general no se asoció con un mejor crecimiento. La concentración de clorofila no presentó diferencias entre los tratamientos de fertilización ni de presencia de especies herbáceas.

Por otro lado, la presencia de *L. mexicanus* incrementó la altura de los pinos ya sea que la presencia de esta especie fue de forma individual (63,13 ± 1,49 cm) o combinada (63,95 ± 1,84 cm), y las diferencias fueron significativas [ $F_{(3,123)} = 5,51$ ;  $p = 0,001$ ] cuando se les comparó con el control (54,16 ± 1,88 cm); la fertilización no tuvo efectos detectables (Fig. 1A).

*Lupinus mexicanus* incrementó el diámetro en la base (DAB) causando diferencias significativas [ $F_{(3,123)} = 6,55$ ;  $p = 0,0003$ ]; los pinos con esta especie presente tuvieron un diámetro de 1,67 ± 0,054 cm, y las plantas control de 1,36 ± 0,05 cm. Las tendencias de esta variable fueron muy parecidas a lo que ocurrió con la altura, presentando un incremento en el diámetro de las plantas por asociación con la leguminosa (Fig. 1B). La leguminosa también incrementó la cobertura, presentándose diferencias estadísticamente significativas para esta variable [ $F_{(3,123)} = 8,35$ ;  $p = 0,0004$ ]; la cobertura fue mayor cuando la leguminosa estuvo presente en forma individual (0,065 ± 0,003 m<sup>2</sup>) o combinada (0,0594 ± 0,003 m<sup>2</sup>), que en el control (0,0454 ± 0,003 m<sup>2</sup>). Los valores mayores corresponden a las plantas en asociación con la leguminosa (Fig. 1C). También la presencia de esta especie herbácea incrementó significativamente el número de ramas [ $F_{(3,123)} = 8,73$ ;  $p < 0,0001$ ;  $L = 7 \pm 0,511$ ;  $T = 5,54 \pm 0,334$ ;  $L+T = 5,86 \pm 0,37$ ;  $C = 4,12 \pm 0,23$ ). En esta variable, las plantas control presentaron valores menores, donde las plantas contaron con un eje principal donde se está elongando la yema, con escasa ramificación, por lo que en consecuencia la cobertura también fue menor. La asociación con *L. mexicanus* incrementó la ramificación del pino; la influencia de la leguminosa fue significativamente mayor que el efecto de *T. tubiformis* (Fig. 1D). Además, incrementó significativamente la longitud de ramas con hojas [ $F_{(3,123)} = 3,76$ ;  $p = 0,012$ ;  $L = 69,11 \pm 3,96$  cm;  $T = 53,21 \pm 3,03$  cm;  $L+T = 55,97 \pm 3,62$  cm;  $C = 59,39 \pm 3,53$  cm] (Fig. 1E).

La presencia de especies herbáceas pioneras incrementó significativamente la supervivencia de *Pinus pseudostrabus* ( $X^2 = 0,09$ ;  $p = 0,028$ ) (Fig. 1F). La supervivencia fue mayor cuando se encontró en asociación con *L. mexicanus*, presentando una su-

**Tabla 3.** Análisis de Varianza (ANOVA) aplicado a la altura, diámetro a la altura de la base (DAB), cobertura, número y longitud de ramas con hojas, y supervivencia de *Pinus pseudostrobus* en presencia de fertilización y asociación con las especies herbáceas pioneras *Lupinus mexicanus* y *Tithonia tubaeformis*.

**Table 3.** Analysis of variance applied to height, diameter of the stem base, cover, number of branches, length of branches with leaves and survival of *Pinus pseudostrobus* under fertilization treatments and in association with pioneer herbaceous species (*Lupinus mexicanus* and *Tithonia tubaeformis*).

Variable	Factores	G.L.	S.C.	C.M.	Valor F	Valor p
Altura	Herbáceas	3	2091,19	697,06	5,1	0,001
	Fertilización	3	112,31	37,44	0,29	0,83
	Herb:Fert	9	719,98	79,99	0,63	0,77
	Residuales	123	15559,47	126,49		
Diámetro a la altura de la base (DAB)	Herbáceas	3	2,13	0,71	6,55	0,0003
	Fertilización	3	0,06	0,02	0,18	0,91
	Herb:Fert	9	0,55	0,06	0,57	0,82
	Residuales	123	13,33	0,11		
Cobertura	Herbáceas	3	0,008	0,0026	8,35	0,00004
	Fertilización	3	0,0004	0,0001	0,44	0,72
	Herb:Fert	9	0,0023	0,0003	0,84	0,58
	Residuales	123	0,039	0,00031		
Número de ramas	Herbáceas	3	142,49	47,49	8,73	0,00002
	Fertilización	3	10,03	3,34	0,61	0,61
	Herb:Fert	9	42,99	4,78	0,88	0,54
	Residuales	123	668,97	5,44		
Longitud de planta con hojas	Herbáceas	3	5269,77	1756,59	3,76	0,012
	Fertilización	3	801,50	267,17	0,57	0,63
	Herb:Fert	9	2566,90	285,21	0,61	0,79
	Residuales	123	57427,70	466,89		

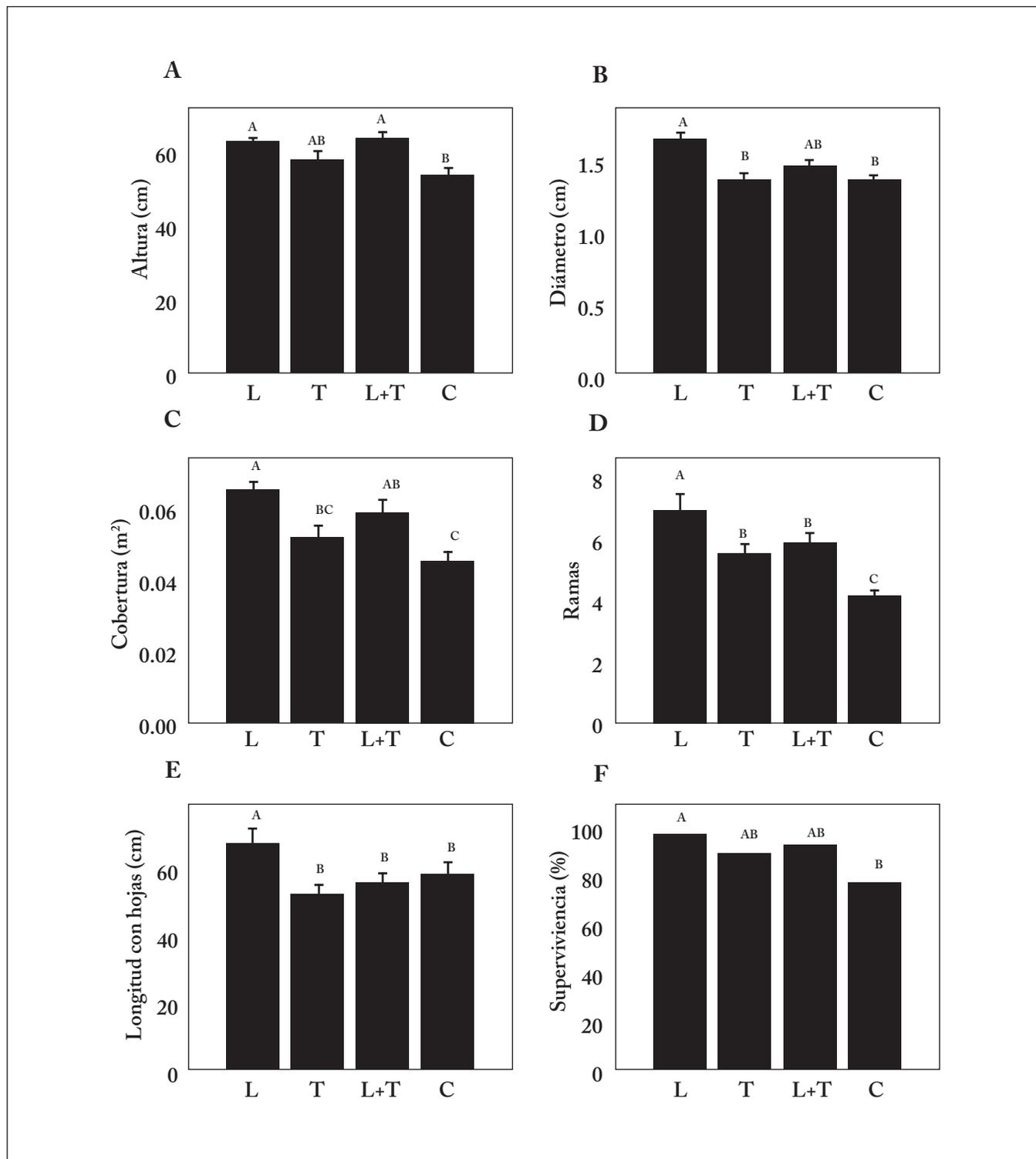
pervivencia del 98%; con *T. tubimormis* 90%; con ambas especies 93%, y las plantas control (sin herbáceas pioneras) 78%. Aún cuando las herbáceas no crecieron más de 20 cm, representaron un aporte para el crecimiento y supervivencia de los pinos.

## DISCUSIÓN

Generalmente el proceso de revegetación de sitios severamente degradados se ha concentrado en el uso de pastos y en menor medida de herbáceas, ignorando casi en su totalidad a arbustos y árboles (Suárez, 1998; Rivera-Posada y Sinisterra-Reyes, 2005). Esto es debido a que la cobertura del suelo con vegetación herbácea ha demostrado ser la práctica más eficiente en la prevención de la erosión en las zonas de ladera (Federacafé, 1982). Sin embargo, la vegetación arbórea y arbustiva permite que se presenten sistemas radicales de mayor anclaje, aumentando la resistencia del suelo a la ruptura, fracturación o fallamiento (Waldron, 1977; Rivera-Posada y Sinisterra-Reyes,

2005). El refuerzo mecánico se manifiesta en un aumento considerable en el componente cohesivo, debido al peso de la vegetación y a la interacción entre el suelo y las raíces (O'Loughlin y Ziemer, 1982). La vegetación al remover cantidades considerables de agua del suelo por transpiración, disminuye la presión de agua en los poros (Ziemer, 1981).

El suelo del sitio de estudio, acrisol ócrico, presenta condiciones que dificultan el desarrollo de las plantas, pues el fósforo se encuentra unido a minerales de Al y Fe lo que lo hace insoluble, y por lo tanto no disponible para las plantas. El fósforo es uno de los nutrientes esenciales para las plantas, pero también, es uno de los elementos que con mayor frecuencia resulta limitante por su alta interacción con la matriz del suelo (Oliet et al., 2005). Cuando este elemento se encuentra en cantidades mínimas, la adición se tiene que realizar por periodos prolongados de tiempo (McGrath et al., 2001). En el sistema estudiado, la fertilización no tuvo efecto en el crecimiento del pino. Una hipótesis a explorar,



**Fig. 1.** (A) Altura, (B) Diámetro a la altura de la base (DAB), (C) Cobertura, (D) Número de ramas, (E). Longitud de ramas con hojas, y (F) Supervivencia de *Pinus pseudostrabus* en asociación con especies pioneras herbáceas *Lupinus mexicanus* y *Tithonia tubiformis*. Las barras indican el error estándar y las letras grupos de acuerdo a la prueba de Tukey.

**Fig. 1.** (A) Height, (B) Diameter to the height of base, (C) Cover, (D) Number of branches, (E) Length of branches with leaves, and (F) Survival of *Pinus pseudostrabus* in association of pioneer herbaceous species *Lupinus mexicanus* and *Tithonia tubiformis*. The bars indicate the standard error and the letters groups according to the Tukey test.

es que el fósforo quedó retenido en el suelo y no estuvo disponible para su absorción por la planta. Esto sugiere que la adición de otros agentes biológicos, como son los hongos micorrízicos, podría mejorar la disponibilidad de este nutriente para las plantas. Aún cuando no se descarta la opción de que las herbáceas absorbieron fósforo, no se observó competencia entre el pino con las herbáceas; se esperaba que los valores medios de las variables evaluadas en *P. pseudostrobus* fueran menores en presencia de las herbáceas que en el control. Cada herbácea presentó una altura menor a los 20 cm; al senecer, su biomasa fue incorporada a los contenedores, y se realizó la siembra posterior. Debido a que ambas especies de herbáceas son anuales, este proceso podría explicar que no se detectara un efecto de competencia, pero sí un efecto positivo de su presencia.

*Pinus pseudostrobus* pudo mejorar su crecimiento y supervivencia en presencia de *Lupinus mexicanus*, efecto que se observó en todas las variables evaluadas: altura, diámetro, cobertura, número de ramas y longitud de ramas con hojas. Esta última variable, relacionada con el área fotosintética, es fundamental para el establecimiento de las plantas, ya que las plantas con mayor longitud de ramas con hojas pueden tener una mayor área fotosintética. La variable cobertura, puede ser muy importante para crear condiciones de microambiente, lo que podría representar el establecimiento de otras especies del sotobosque. Esto es debido a que puede amortiguar los cambios drásticos de temperatura; por otro lado, puede influir de manera significativa en disminuir la erosión por efecto de la lluvia, al incrementar la cobertura del suelo.

El uso del fertilizante no mostró ningún efecto. Esto se puede deber a que fueron las herbáceas del sotobosque, sobre todo la leguminosa, las que podrían haber asimilado la mayor parte del fósforo, debido a su capacidad de absorber este nutriente (Corona Mora, 2010) sin la formación de micorrizas.

Sin embargo, independientemente del mecanismo que operó en el experimento y que debe ser estudiado en detalle, se puede afirmar que la presencia de *L. mexicanus* puede representar una opción para incrementar la supervivencia y el crecimiento de *P. pseudostrobus* en el campo. Esto tiene implicaciones directas en la restauración de sitios altamente degradados con fuertes problemas de erosión y presencia de numerosas cárcavas. Las leguminosas son de gran importancia en la restauración ecológica por resistir condiciones limitantes, como baja fertilidad (Vázquez-Yanes et al., 1999), por la ventaja de la fijación de nitrógeno. En este sentido, *L. mexicanus* puede presentar ventajas adicionales.

Se sugiere que (1) en suelos como los acrisoles ócricos, es necesaria la presencia de interacciones entre plantas como las descritas en este estudio, para mejorar el crecimiento de especies herbáceas, y (2) es necesario explorar mecanismos que les permitan a las plantas incorporar el fósforo de manera más eficiente, como puede ser la utilización de hongos micorrízicos (Clark y Zeto, 2000).

## REFERENCIAS

- Acevedo-Sandoval, O., L. Ortiz-Hernández, D. Flores-Román, A. Velásquez-Rodríguez y K. Flores-Castro (2003). Caracterización física y química de los horizontes endurecidos (tepetates) en suelos de origen volcánico del Estado de México. *Agrociencia* 37: 435-449.
- Ávila, L. y O. Vargas (2009). Formación de núcleos de restauración de *Lupinus bogotensis* dentro de claros en plantaciones de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*. En: O. Vargas, O., León y A. Diaz-Espinosa (eds.). Restauración ecológica en zonas invadidas por retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas. Bogotá. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. pp. 234-262.
- Blanco-García, A., C. Sáenz-Romero, C. Martorel, P. Alvarado-Sosa y R. Lindig-Cisneros (2011). Nurse-plant and mulching effects on three conifer species in a Mexican temperate forest. *Ecological Engineering* 37: 994-998.
- Bruno, J., J. Stachowicz y M. Bertness (2003). Inclusion of facilitation into ecological theory. *Trends in Ecology and Evolution* 28: 119-125.
- Calderón de Rzedowsky, G. y J. Rzedowsky (2004). Manual de malezas de la región de Salvatierra, Guanajuato. Flora del Bajío y Regiones Adyacentes. Instituto de Ecología, A. C. Pátzcuaro, Michoacán, México. 313 p.
- Callaway, R. (2007). Positive interactions and Interdependence in plant communities. Netherlands. Springer.
- Carter, G. y A. Knapp (2001). Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *American Journal of Botany* 88: 677-684.
- Clark, R.B. y S.K. Zeto (2000). Mineral acquisition by arbuscular mycorrhizal plants. *Journal of Plant Nutrition* 23: 867-902.
- Corona-Mora, A. (2010). Estudio de la dinámica del fósforo en el desempeño de *Lupinus mexicanus* en condiciones controladas en suelos intemperizados. Tesis profesional. Facultad de Biología. UMSNH. México. 48 p.
- Crawley, M. (2007). The R Book. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England. 949 p.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Centro Nacional de Investigaciones de Café. (1982). Chinchiná (Colombia). Cuarenta años de investigación en Cenicafé. Suelos Vol 1. Chinchiná (Colombia) Cenicafé. 74 p.
- García-Oliva, F. (2005). Algunas bases del enfoque ecosistémico para la restauración. En: Sánchez, O, E. Peters, R. Márquez-Huitzil, E. Vega, G. Portales, M. Valdés y D. Azuara (eds.). Temas sobre restauración ecológica. Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto de Ecología, U.S. Fish and Wildlife Service, Unidos para la conservación A. C. México. pp. 101-111.
- Lichtenthaler, H.K. (1987). Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic membranes. En: Packer, L. y Douce, R. (eds.). Methods in Enzymology, Plant Cell Membranes, Vol. 148. Academic Press, San Diego, California, E.U.A. pp. 350-382.
- Lindig-Cisneros, R., C. Saenz-Romero, N. Alejandre-Melena, E. Aureoles-Celso, S. Galindo-Vallejo, M. Gómez-Romero y E. Medina-Sánchez (2002). Efecto de la profundidad de los depósitos de arena volcánica en el establecimiento de la vegetación nativa en las inmediaciones del Volcán Parícutín, México. *Ciencia Nicolaita* 13: 47-54.

- López-Upton, J. (2002). *Pinus pseudostrobus* Lindl. En: J. A. Vozzo (ed). Tropical Tree Seed Manual. USDA Forest Service. pp. 636-638.
- McGrath, D., M.L. Duryea y W.P. Cropper (2001). Soil phosphorus availability and fine root proliferation in Amazonian agroforests 6 years following forest conversion. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 271-284.
- Medina, L.E. (2002). Erosión hídrica y transporte de sedimentos en la microcuenca de Atécuaro Mich. Tesis profesional. Facultad de Biología UMSNH. México. 58 p.
- Nebel, B.J. y R.T. Wright (1999). Ciencias Ambientales. 6° edición. Editorial Pearson. Educación Prentice Hill. México. 148 p.
- Oberson, A., D.K. Friesen, I.M. Rao, S. Buehler y E. Frossard (2001). Phosphorus transformations in an oxisol under contrasting land-use systems: the role of the soil microbial biomass. *Plant Soil* 237: 197-210.
- O'Loughlin, C. y R.R. Ziemer (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep-land forests. Proceedings of I.U.F.R.O. Workshop P.1.07-00 Ecology of Subalpine Ecosystems a Key to Management. pp. 70-78.
- Oliet J.A, R. Planelles, F.A. Douglass y F. Jacobs (2005). Nursery fertilization and tree shelters affect long-term field response of *Acacia salicina* Lindl. planted in Mediterranean semiarid conditions. *Forest Ecology and Management* 215: 339-351.
- Padilla, F. y F. Pugnaire (2006). The role of nurse plants in the restoration of degraded environments. *Frontiers in Ecology and the Environment* 4: 196-202.
- Quoreshi, A.M. y V.R. Timmer (2000). Early outplanting performance of nutrient-loaded containerized black spruce seedlings inoculated with *Loccacia bicolor*; a bioassay study. *Canadian Journal Forest Restoration* 30: 744-752.
- R Development Core Team (2011). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0. URL: <http://www.R-project.org>.
- Rivera, J.H. (2002). Utilización del Nacedero *Trichanthera gigantea* (H. & B.) Nees. para la prevención y recuperación de áreas degradadas por erosión y remociones masales en suelos de ladera Colombiana. IN: Seminario Taller Tres Especies Vegetales Promisorias para Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria: Nacedero *Trichanthera gigantea*, Botón de oro *Tithonia diversifolia* y Bore *Alocasia macrorrhiza*. Fundación Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria CIPAV. Cali, Colombia. pp. 54-62.
- Rivera-Posada, J.H. y J.A. Sinisterra Reyes (2005). Restauración Social de Suelos Degradados por Erosión y Remociones Masales en Laderas Andinas del Valle del Cauca Colombia con la utilización de obras de Bioingeniería. Quinto congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas, Santiago de Cali. 35 p.
- Ruiz-Reyes, C., M. Gómez-Romero y R. Lindig-Cisneros (2009). Desempeño de *Lupinus elegans* y *Senna hirsuta* bajo condiciones de restauración ecológica. *Biológicas* 11: 10-15.
- Rzedowski, G. y J. Rzedowski (2005). Flora Fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología, A.C. Centro regional del Bajío, Pátzcuaro, Michoacán. CONABIO. 1406 p.
- Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. Ed. Limusa. México. 432 p.
- Sáenz-Romero, C., J. Beaulieu y G.E. Rehfeldt (2011). Variación genética altitudinal entre poblaciones de *Pinus patula* de Oaxaca, México, en cámaras de crecimiento simulando temperaturas de calentamiento global. *Agrociencia* 45: 399-411.
- Smith, R. L. y T. M. Smith (2000). Ecología. 4° edición. Editorial Addison Wesley. España. 458 p.
- Suárez, D.J. (1998). Deslizamientos y estabilización de laderas en zonas tropicales. Corporación para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB). Bucaramanga. 548 p.
- Suárez Pérez, C., I. Orrantía Cárdenas, A. Díaz Medina y R. Hurtado Escalante (2012). El manejo de la flora para la restauración ecológica en áreas protegidas de Tope de Collantes. *Desarrollo Local Sostenible* 5: 1-13.
- Tamm, C.O. (1991). Nitrogen in terrestrial ecosystem. *Ecological Studies* 81: 1-15.
- Tyler, G. (1994). Ecología y Medio ambiente. 7° Ed. Grupo Editorial Iberoamericana, S.A. de C.V. México. 865 p.
- Underwood, A.J. (1997). Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance. Cambridge University Press. 504 p.
- Vázquez-Yanes, C. y A.I. Batis-Muñoz (1996). Adaptación de árboles nativos valiosos para la Restauración ecológica y la reforestación. Centro de Ecología. UNAM. México 75 p.
- Vázquez-Yanes, C., A.I. Batis-Muñoz, M.I. Alcocer Silva, M. Gual Díaz y C. Sánchez-Dirzo (1999). Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y reforestación. Reporte técnico del proyecto 1084 CONABIO. Instituto de Ecología UNAM. México. 38 p.
- Vitousek, P.M. (2004). Nutrient Cycling and limitation. Princeton University press. Oxford and Princeton. E.U.A. 233 p.
- Vitousek, P.M. y R. Howarth (1991). Nitrogen limitation on land and in the sea: how can it occur? *Biogeochemistry* 13: 87-115.
- Waldron, L.J. (1977). The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of American Journal* 4: 843-849.
- Warner, G., M. Bravo, J. Frchevers, J. F. Gallrdo, M. Haulon, M. Mazzoncaini, L. Padilla, C. Prat, J. Queitsch, A. Vera Vidal y E. Zapata (2007). Alternative Agriculture for sustainable rehabilitation of deteriorated volcanic soils in México and Chile (REVOLSO) 2002-2006; INCO-DEV (International Cooperation with Developing Countries 1998-2002). Final report. Univ. Giessen Giessen, Alemania. pp. 123-128.
- Ziemer, R.R. (1981). The role of vegetation in the stability of rooted slopes. En: Proceedings of the International Union of Forestry Research, XVII World Congress. Kyoto, Japan. pp. 297-308.