

CIENCIA FORESTAL

en México

ISSN 1405-3586

REV. CIEN. FOR. EN MÉX. VOL. 26 NÚM. 89 100 p. MÉXICO, D.F. ENE-JUN 2001

inifap

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN FORESTAL

CIENCIA FORESTAL

en México

VOL. 26

ENE-JUN 2001

NÚM. 89

CONTENIDO

	Pág.
EDITORIAL	3
IMPACTO DEL OZONO SOBRE EL POLEN DE <i>Pinus hartwegii</i> Lindl. Tomás Hernández Tejeda, Roger M. Cox, John Malcolm, María de Lourdes de la Isla de Bauer, Jesús Vargas Hernández, Alejandro Velázquez Martínez y Dionicio Alvarado Rosales	5
CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN Ana Rita Román Jiménez, J. Jesús Vargas Hernández, Gustavo Adolfo Baca Castillo, Antonio Trinidad Santos y Manuel Pomposo Alarcón Bustamante	19
DURABILIDAD NATURAL EN ÁREA CEMENTERIO DE SIETE ESPECIES DE ENCINO DEL ESTADO DE GUANAJUATO Luis Vázquez Silva, José Amador Honorato Salazar y Francisco J. Zamudio Sánchez	45
VARIACIÓN GEOGRÁFICA EN LA RESPUESTA A LA SEQUÍA EN PLÁNTULAS DE <i>Pinus greggii</i> Engelm. Carmelo Hernández Pérez, J. Jesús Vargas Hernández, Carlos Ramírez Herrera y Abel Muñoz Orozco	61
DESARROLLO AGROFORESTAL COMUNITARIO SUSTENTABLE EN LA REGIÓN FRONTERIZA MÉXICO-ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA Concepción Luján Álvarez, Constance L. Falk, Christopher A. Erickson, John G. Mexal y Humberto Luján Álvarez	81
CONSEJO ARBITRAL	93
CONSEJO EDITORIAL	97

IMPACTO DEL OZONO SOBRE EL POLEN DE *Pinus hartwegii* Lindl.

Tomás Hernández Tejeda¹, Roger M. Cox², John Malcolm²,
María de Lourdes de la Isla de Bauer³, Jesús Vargas Hernández⁴,
Alejandro Velázquez Martínez⁴, Dionicio Alvarado Rosales⁵

RESUMEN

La contaminación atmosférica, particularmente los oxidantes fotoquímicos, inducen cambios en los procesos reproductivos de las especies vegetales. En este estudio se determinó el efecto del ozono sobre el crecimiento del tubo polínico y la germinación de los granos de polen de *Pinus hartwegii* procedentes de tres áreas forestales ubicadas dentro de la Cuenca Atmosférica de la Ciudad de México, con diferencias en la exposición al ozono: Desierto de los Leones, Ajusco y Zoquiapan. Alrededor de 2,000 granos de polen se depositaron en cada gota de 50 µl de un medio de cultivo de tejidos (Solución Brewbaker) más un solidificante "Gelrite". Las gotas se colocaron sobre portaobjetos de vidrio, dentro de cajas de Petri, que se destaparon únicamente en ambos periodos de fumigación. El polen se fumigó artificialmente en cámaras especiales, con: 0.03 (testigo), 0.20 y 0.30 ppm de ozono, 3 horas diarias, durante 3 ó 6 días consecutivos. Los resultados indicaron que los granos de polen fueron afectados por el ozono con la misma intensidad, independientemente de su procedencia. La inhibición de la germinación y del crecimiento del tubo polínico del polen de *P. hartwegii* fue mayor en altas concentraciones de ozono; asimismo, el porcentaje de germinación decreció significativamente al prolongarse el periodo de exposición a ozono.

Palabras clave: Fumigación, germinación de polen, ozono, *Pinus hartwegii*, polen, tubo polínico.

Fecha de recepción: 14 de marzo de 2002.

Fecha de aceptación: 10 de febrero de 2004.

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Conservación y Mejoramiento de Ecosistemas Forestales (CENID-COMEF), INIFAP, Ave. Progreso No. 5, Viveros de Coyoacán 04110 México, D.F. hernandez_tomas@inifap.gob.mx

² Canadian Forest Service—Maritimes, Natural Resources Canada.

³ Colegio de Postgraduados. Programa de Hidrociencias.

⁴ Colegio de Postgraduados. Programa Forestal.

⁵ Colegio de Postgraduados. Programa de Fitopatología.

ABSTRACT

Air pollution, particularly photochemical oxidants, induces changes in the reproductive processes of vegetative species. In this study, the effect of ozone on germination and tube growth of *Pinus hartwegii* pollen grains was investigated. Pollen was collected from 3 forest areas in the Mexico City Air Basin with varying air pollution exposure levels: Desierto de los Leones, Ajusco and Zoquiapan. It was suspended in tissue culture media (Brewbaker solution) plus a solidifying agent (Gelrite) at a concentration near 2,000 grains per 50 μ l droplet. Droplets were deposited on glass slides, which were incubated in Petri dishes that served as humidity chambers. The Petri dishes were opened daily only during the periods of ozone fumigation. The pine pollen was artificially exposed in special fumigation chambers to: 0.03 (control), 0.20 and 0.30 ppm ozone for 3 hours per day, for 3 or 6 consecutive days. Results showed that pollen grains were equally affected by ozone, in spite of their site of origin. The inhibition of germination and tube growth of *P. hartwegii* pollen was greater at higher ozone concentrations, and pollen germination decreased significantly ozone exposure periods were longer.

Key words: Fumigation, pollen germination, ozone, *Pinus hartwegii*, pollen, pollinic tube.

INTRODUCCIÓN

Los cambios en los procesos reproductivos inducidos por la contaminación atmosférica no son tan fácilmente observables o reconocibles en los ecosistemas forestales, como ocurre con los síntomas foliares en las especies arbóreas. Sin embargo, se ha comprobado que este factor puede influir sobre la reproducción de las plantas al inhibir en mayor o menor grado la fotosíntesis y a la vez ocasionar cambios en la distribución de los metabolitos; además, los eventos críticos en los ciclos reproductivos pueden afectarse directamente por la exposición a los contaminantes atmosféricos. Asimismo, y de acuerdo con los resultados encontrados en *Pinus strobus* L., la exposición al ozono puede causar una reducción en la viabilidad del polen (Benoit *et al.*, 1983).

Wolters y Martens (1987) establecieron que la germinación y el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen son impactados por los contaminantes atmosféricos tanto *in vivo* como *in vitro*. Estos autores mencionaron que la estimulación o inhibición de ambos parámetros de viabilidad del polen dependen de la especie, así como del tipo de contaminante y su concentración, del tiempo de exposición y de la humedad relativa. La reducción de la capacidad germinativa y del crecimiento del tubo polínico de los granos de polen obviamente afecta

de manera negativa la producción de semillas y, por lo tanto, la capacidad reproductiva de los árboles.

Cox (1989) afirmó que, independientemente de la manera en que los contaminantes afectan al polen, la repercusión genética de la contaminación atmosférica también induce cambios en la competencia entre los granos de polen sobre el estilo, lo que da como resultado una reducción en la variación de los genotipos de la próxima generación. Smith (1981) aseguró que la reproducción sexual en las especies forestales es muy importante para mantener su flexibilidad genética y la persistencia de la mayoría de las especies en comunidades forestales naturales.

Diversos investigadores también han mencionado que la sensibilidad del polen a la exposición de ozono se correlaciona con la sensibilidad foliar al ozono en muchas variedades de cultivos agrícolas anuales (Feder, 1968; Feder y Sullivan, 1969; Mumford *et al.*, 1972; Harrison y Feder, 1974).

Dentro de la serie de estudios de los efectos de la contaminación atmosférica sobre polen figuran los realizados por Cox (1983, 1985, 1987, 1988 y 1992), quien ha observado que la aspersion simulada de lluvia ácida afecta la germinación y el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen en algunas especies forestales de Canadá. Asimismo, este autor ha señalado que la liberación prematura o retrasada del polen puede imposibilitar la fertilización del óvulo y afirmó que la posibilidad de recolonización de un área forestal decrecerá si la reproducción sexual se reduce.

Benoit *et al.* (1983) colectaron polen en árboles de *P. strobus* que se comportaron como sensibles, intermedios y tolerantes a la contaminación atmosférica por oxidantes fotoquímicos, de acuerdo con la manifestación de los síntomas foliares. Al fumigar los granos de polen pudieron reconocer que el porcentaje de germinación se redujo significativamente ($P \leq 0.05$) cuando se expusieron a 0.15 ppm de ozono durante 4 horas, bajo condiciones de alta humedad (agua libre). Sin embargo, la longitud promedio de los tubos polínicos no se redujo significativamente por el ozono.

Además, los autores citados anteriormente, comprobaron que la sensibilidad del polen al ozono no se correlacionó con la sensibilidad del follaje a este componente, quizá porque el polen de los pinos está menos hidratado que el polen de los cultivos agrícolas, que a su vez son más activos fisiológicamente, debido a sus períodos reproductivos cortos. En cambio, el polen y el follaje de los cultivos son igualmente sensibles (Benoit *et al.*, 1983).

Kormutak *et al.* (1994) estimaron la viabilidad de los granos de polen colectados en 16 árboles de *Abies alba* Mill., que crecían de manera natural en tres sitios con diferentes grados de contaminación atmosférica, generados por una

fábrica procesadora de aluminio, otra de químicos y por una carboeléctrica. Los autores identificaron que el porcentaje de germinación de los granos de polen y el crecimiento del tubo polínico variaron considerablemente entre árboles individuales; y en la mayoría de los casos la variación estuvo correlacionada positivamente con el grado de contaminación del sitio de prueba. Apreciaron que la germinación de los granos de polen fue más sensible a la contaminación atmosférica que el crecimiento de los tubos polínicos.

En la mayoría de las especies de pinos de nuestro país, la polinización ocurre en la primavera (Niembro-Rocas, 1986). En ese momento, las brácteas de los estróbilos femeninos están ligeramente separadas y los granos de polen penetran entre las brácteas y se anidan en el exudado micropilar (Mirov, 1969). El estado de receptividad de las flores femeninas por lo general dura de uno a tres días, al cabo de los cuales las escamas se cierran como resultado de su crecimiento (Niembro-Rocas, 1986). La mayoría de los granos de polen que entran a la cámara polínica inician su germinación unos días después, especialmente si la temperatura del óvulo es de 30 a 32°C (McWilliam, 1959); sin embargo solo unos cuantos sobreviven y llegan a emitir su tubo polínico (Stockwell, 1939, citado por Niembro-Rocas, 1986).

El crecimiento de esta última estructura sucede en completa oscuridad y posiblemente con baja concentración de oxígeno, debido a que el micrópilo se cierra después de terminada la polinización (McWilliam, 1960). El grano de polen crece muy lentamente durante los siguientes once meses posteriores a la polinización. Al llegar el invierno el proceso se detiene para reanudarse en la primavera del siguiente año (Niembro-Rocas, 1986).

El Gobierno de la Ciudad de México diariamente da a conocer la concentración de los contaminantes atmosféricos más importantes, entre los que destaca el ozono por su abundancia y distribución; sin embargo, no existen datos suficientes sobre el tipo y concentración de contaminantes atmosféricos presentes dentro de las áreas forestales aledañas. En la actualidad sólo se tiene una estación de monitoreo de ozono instalada desde 1990, en el ex-convento del Parque Nacional Forestal Desierto de los Leones, D. F., que registra los datos de ozono diariamente, a excepción de algunos periodos cortos, debido a obras de mantenimiento, reparación del equipo de monitoreo o falta de energía eléctrica. Con los datos obtenidos Miller *et al.* (1994) confirmaron el impacto negativo del ozono sobre la vegetación del Parque.

Con la ayuda de monitores pasivos se determinó la concentración del ozono dentro de tres áreas forestales de la Cuenca Atmosférica de la Ciudad de México (CACM), por un periodo de 18 meses (julio de 1997 a diciembre de 1998). La registrada (promedios de 14 días) en el Ajusco y en el Desierto de los Leones, D.F. varió de 0.09 a 0.12 ppm y en Zoquiapan, Méx., fue ligeramente menor

a la de las otras dos áreas (Hernández, Cox y Bauer. Datos no publicados).

En las áreas forestales del sur de la Ciudad de México se han observado los daños de los oxidantes fotoquímicos sobre la vegetación natural e introducida desde hace más de 20 años (Bauer y Hernández, 1986; Miller *et al.*, 2002); sin embargo, hasta la fecha nadie ha señalado el efecto del ozono sobre la germinación y el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen de *P. hartwegii*.

Se planteó la hipótesis de que la reducción en la viabilidad de los granos de polen, inducida por el ozono, es una de las causas más importantes de la falta de regeneración natural en los bosques de pino del sur de la Ciudad de México.

Los objetivos fueron determinar el efecto de la concentración de ozono y del tiempo de exposición, así como la variación entre las localidades, sobre el crecimiento del tubo polínico y la germinación de los granos de polen de *P. hartwegii* de la CACM.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material vegetal en estudio se colectó en rodales naturales de *Pinus hartwegii* ubicados dentro de la CACM, en tres áreas forestales conocidas: Zoquiapan, Méx., Ajusco, D. F. y Desierto de los Leones, D. F., que difieren tanto en la concentración y tiempo de exposición al ozono, como en el grado de daño consecuente por la contaminación atmosférica sobre la vegetación forestal y otras especies de plantas nativas.

El polen se extrajo de estróbilos masculinos maduros de árboles individuales de *P. hartwegii*. Los árboles se ubicaron a tres diferentes alturas sobre el nivel del mar (estratos), dentro de cada una de las tres localidades en estudio (Cuadro 1). Los estróbilos se colectaron y se etiquetaron en campo a finales de abril de 1998; fueron depositados en bolsas de papel y en el laboratorio permanecieron a temperatura ambiente ($22 \pm 3^\circ\text{C}$) durante siete días, hasta que el polen se tamizó y se colocó en frascos individuales. A principios de mayo de 1998 se llevó el polen al laboratorio del Dr. Roger M. Cox, del Servicio Forestal Canadiense en Fredericton, New Brunswick, Canadá, donde se almacenó a 3.1°C , dentro de un desecador, en frascos de vidrio color ámbar de 100 ml, con las tapas flojas.

En mayo del mismo año se inició el estudio con algunas pruebas de laboratorio para seleccionar el mejor medio de cultivo, así como ensayos de temperatura, humedad relativa y viabilidad, para determinar las condiciones óptimas de desarrollo de los granos de polen.

El primer medio de cultivo experimental que se usó para conocer la viabilidad del polen, fue agua destilada. Se utilizaron portaobjetos de vidrio excavados

Cuadro 1. Ubicación de las procedencias y número de lotes (árboles) donde se colectó el polen de *Pinus hartwegii*

Localidad	Coordenadas	Estrato (msnm)	No. de lotes (árboles)
Zoquiapan, Méx.	19°19'24"N 98°43'08"W	Parte alta (3,320)	3
	19°18'28"N 98°42'32"W	Parte media (3,240)	3
	19°17'24"N 98°42'28"W	Parte baja (3,125)	3
Ajusco, D. F.	19°13'44"N 99°14'52"W	Parte alta (3,400)	2
	19°13'36"N 99°15'24"W	Parte media (3,225)	2
Desierto de los Leones, D. F.	19°16'44"N 99°19'36"W	Parte alta (3,540)	3
	19°16'20"N 99°19'34"W	Parte media (3,370)	1

y planos donde se colocaron gotas de 50 µl, que fueron inoculadas con granos de polen de diversos lotes. Debido a que todos ellos se concentraron en la parte más alta de la gota, no se pudo contabilizar el número de granos germinados, ni medir el crecimiento del tubo polínico. Además, desde los primeros días se produjo contaminación por hongos y bacterias.

El mejor medio de cultivo para germinar los granos de polen fue la solución de Brewbaker (Brewbaker y Kwack, 1963) más el solidificante Gelrite (Merck and Company, Inc. Kelco División), que además permitió un excelente crecimiento del tubo polínico. Se prepararon cuatro soluciones madre, de 125 ml de cada una, con agua destilada más 1.0% de H_3BO_3 , 4.32% de $Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$, 4.08% de $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ y 1.0% de KNO_3 , que se mantuvieron por separado y en refrigeración. Para preparar la solución Brewbaker se tomó 1 ml de cada solución madre y se aforó con agua destilada hasta 100 ml. El $Ca(NO_3)_2 \cdot 4 H_2O$ se agregó al final, con el fin de evitar su precipitación. A la solución se agregó 15% de sucrosa más 0.05% de Gelrite y se esterilizó en autoclave por 15 minutos a 121.4°C y 16.6 psi. Finalmente se agregaron 15 ppm de micostatin y 15 ppm de cloranfenicol, para evitar la proliferación de hongos y bacterias en el medio de cultivo. La adición del Gelrite al medio de cultivo evitó la acumulación de los granos de polen en la parte alta de la gota.

Se llevaron a cabo dos experimentos paralelos de fumigación artificial con ozono a los granos de polen de *P. hartwegii*; en el primero, éstos fueron fumigados

durante tres horas diarias, por tres días consecutivos, con los tratamientos siguientes: 0.03 (testigo), 0.20 y 0.30 ppm. En el segundo experimento se utilizaron las mismas concentraciones de ozono y el mismo tiempo de exposición diaria, pero el período de exposición se incrementó a seis días consecutivos. El monitor de ozono empleado fue un "U.V. Photometric O₃ Analyzer" (Termo Environmental Instruments, Inc.) y el aparato productor de ozono fue un "Ozone Generator" (Grifing Technics Corporation).

Antes de iniciar los experimentos de exposición de los granos de polen al ozono, se aleatorizó la distribución de las cajas de Petri, que contenían los portaobjetos con la solución nutritiva, el gelatinizante y el polen, dentro de las tres cámaras especiales de fumigación diseñadas por el Dr. Roger M. Cox, una de las cuales sirvió como testigo. En cada caja se pusieron cuatro portaobjetos y a cada uno de ellos se le colocó una gota de 50 µl de solución nutritiva Brewbaker además del Gelrite. A cada gota se le aplicaron 2,000 granos de polen aproximadamente, que se distribuyeron de manera homogénea con un pincel de pelo de camello. Las exposiciones con ozono se iniciaron el mismo día que se inoculó el polen sobre las gotas de medio de cultivo.

Las cajas de Petri se destapaban durante tres horas, inclusive las testigos, con el objeto de que el polen y las gotas del medio de cultivo estuvieran expuestas, tanto a las condiciones de temperatura y contenido de humedad, como a las mismas concentraciones de ozono. Al terminar la exposición diaria, las cajas se tapaban y se dejaban dentro de la cámara de fumigación correspondiente, hasta concluir con su período de exposición, antes de ser transferidas a la cámara testigo.

El estudio incluyó tres diferentes concentraciones de ozono y el polen de 12 árboles de pino, el que se inoculó en cuatro portaobjetos por cada árbol, con el fin de usar dos portaobjetos para el experimento de tres días y dos para el de seis días, lo que da un número total de muestras de 144.

La temperatura al interior de las cámaras fue de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ y la humedad relativa se incrementó a $95 \pm 3\%$, con el objeto de que el polen germinara y emitiera su tubo polínico en óptimas condiciones. La fumigación con ozono, la temperatura y la humedad relativa, dentro de las cámaras se controlaron con un programa computarizado conocido como "CALNB94".

Al terminar ambos experimentos, es decir, 144 horas después de la inoculación del polen en las gotas de solución nutritiva, se les aplicaron 25 µl de ácido acético al 50%, con el fin de detener el proceso natural de desarrollo de los granos de polen, y así poder llevar a cabo el conteo de la germinación y la medición de la longitud del tubo polínico en todos los tratamientos. La primera se determinó en 10% de los granos de polen, con un microscopio de luz, en cinco diferentes campos y con ocular 10X. Se consideraron como germinados

aquellos granos de polen con tubos germinativos mayores a su propio diámetro. La medición del tubo polínico se realizó en 5% de los granos, con un microscopio de luz, en 10 diferentes campos, un ocular 10X y una tableta digitalizadora conectada a una computadora que usó el programa "Sigma-ScanTM", versión 3.90 (Jandel Scientific).

Los valores del porcentaje de germinación en ambos ensayos se transformaron con la función arco-seno, y los del crecimiento del tubo polínico, mediante el logaritmo natural base 10. Los datos calculados de cada experimento se sometieron a un análisis de varianza por separado, que incluyó los factores: dosis de ozono (0.03, 0.20 y 0.30 ppm), localidades (Desierto de los Leones, Ajusco y Zoquiapan) y estratos dentro de localidades (alto, medio y bajo), así como las interacciones entre otros factores. En el caso donde se encontraron efectos significativos se llevó a cabo una prueba de comparación de medias (Duncan Range Test).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza (ANOVA) del porcentaje de germinación (%G) y del crecimiento del tubo polínico (CT) de los granos de polen fumigados con ozono, mostró la existencia de diferencias estadísticas significativas únicamente entre tratamientos, tanto con los datos originales como con los transformados en ambos ensayos de fumigación (Cuadro 2). No se confirmaron diferencias entre localidades, ni estratos de colecta, ni tampoco una interacción significativa con los factores considerados. Al hacer la transformación de los datos, el coeficiente de variación se redujo; sin embargo, la comparación de medias con ambos tipos de datos produjo un comportamiento igual en los resultados y su significancia, razón por la cual se presentan los datos originales sin transformar (Cuadro 3).

Las diferencias mínimas significativas de los tratamientos, de acuerdo con la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$), indican que la aplicación de 0.30 ppm de ozono durante seis días consecutivos redujo 45% la germinación de los granos de polen en comparación con el testigo que mostró 79%; en cambio, con la aplicación de 0.20 ppm, no se verificaron diferencias estadísticas significativas, a pesar de apreciarse una ligera reducción en la capacidad germinativa. Por otra parte, en el periodo de fumigación de tres días consecutivos no hubo diferencias significativas en el %G bajo ningún tratamiento (Cuadro 3).

Es posible que los granos de polen tratados por tres días consecutivos, con diferentes concentraciones de ozono, hayan recuperado su capacidad germinativa, puesto que se colocaron en la cámara de fumigación con aire limpio los siguientes tres días, antes de evaluar su germinación, junto con el experimento de seis días de exposición.

Cuadro 2. Análisis de varianza del porcentaje de germinación (%G) y el crecimiento del tubo polínico (CT) de los granos de polen de *Pinus hartwegii* fumigados con ozono.

Factor de variación	gl	CM			
		Tres días		Seis días	
		%G	CT	%G	CT
Tratamiento (T)	2	159.15	7,820.81**	5,124.71**	7,004.95*
Localidad (L)	2	75.58	686.86	195.78	2,375.60
T * L	4	23.99	225.36	91.95	258.75
Estrato (L)	4	183.42	1,193.80	215.66	751.86
Estrato * T (L)	8	7.18	795.67	103.16	625.77
Error	30	84.10	1,097.46	322.53	1,687.72
C V (%)		11.23	28.76	27.93	35.65

*Significativo ($P \leq 0.05$) **Altamente significativo ($P \leq 0.01$) CV = Coeficiente de variación.

Cuadro 3. Valores promedio del porcentaje de germinación (%G) y del crecimiento del tubo polínico en μ (CT) de los granos de polen de *Pinus hartwegii* fumigados con diferentes concentraciones de ozono.

Concentración de ozono (ppm)	Tres días		Seis días	
	%G	CT	%G	CT
0.03* ^b	84 a	133 a	79 a	133 a
0.20	81 a	120 a	67 a	119 a b
0.30	78 a	91 b	45 b	93 b
DMS (5 %)	6.7	24	13.2	30

Medias con la misma letra indican igual significancia. *Testigo. DMS = Diferencia mínima significativa.

Las diferencias mínimas significativas de los tratamientos, de acuerdo con la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$), señalan que la aplicación de 0.30 ppm de ozono durante seis días consecutivos reduce el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen hasta 93μ , en comparación con el testigo que mostró una longitud promedio de 133μ . Además, la exposición con 0.20 ppm también difirió estadísticamente del testigo. Por otra parte, en el período de tres días consecutivos, sólo con el tratamiento de 0.30 ppm se observó una reducción significativa en el crecimiento del tubo polínico (Cuadro 3).

El crecimiento del tubo polínico se redujo independientemente de la duración del tiempo de exposición; es decir, basta que se exponga el polen poco tiempo para ser afectado, sobre todo a altas concentraciones de ozono. Por otra parte, el porcentaje de germinación sólo se afecta drásticamente cuando el tiempo de exposición y la concentración de ozono aumentan en forma simultánea. De acuerdo con lo anterior, se puede asumir que el crecimiento de los tubos polínicos es más sensible al ozono que la germinación de los granos de polen de *P. hartwegii*.

En contraste, Benoit *et al.* (1983) observaron exactamente lo contrario en polen de *P. strobus* sometido a fumigaciones con ozono; cuyo tratamiento ocasionó una reducción en el porcentaje de germinación de los granos de polen humedecidos, aun con dosis de 0.15 ppm de ozono durante cuatro horas, pero sin afectar la longitud media de los tubos polínicos. Sin embargo, la misma dosis de ozono no redujo significativamente la germinación del polen en seco. Kornosky y Stairs (citados por Benoit *et al.*, 1983) reconocieron el mismo patrón de comportamiento cuando expusieron el polen de especies forestales a SO_2 .

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro 2), no hubo diferencias significativas entre las localidades, ni entre los estratos, ni tampoco una interacción significativa de estos factores con los tratamientos de fumigación. La concentración de ozono impacta de igual manera la capacidad germinativa del polen de las diferentes localidades de la CACM. Asimismo, en los bosques del sur de la CACM, dicho factor es vertical y decrece ligeramente conforme aumenta la altura sobre el nivel del mar (Hernández, Cox y Bauer: Datos no publicados), lo que significa que todos los árboles de pino son potencialmente dañados por el ozono generado en la Ciudad de México, a pesar de la altitud diferencial donde se localizan.

La estación del Pedregal de la red de monitoreo de la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), registró concentraciones hasta de 0.30 ppm de ozono por tres horas o más en algunos días de enero a abril de 1998, período en el que se colectó el polen. En el año de 1997 el valor máximo, mínimo y promedio de ozono de la segunda concentración máxima anual en seis estaciones de monitoreo fue de 0.30, 0.20 y 0.25 ppm,

respectivamente (INEGI, 1999). Desde 1998 se ha observado una tendencia a la baja de las concentraciones de ozono registradas diariamente dentro de la ZMVM; sin embargo, se continúa rebasando la norma de calidad del aire en el 90% de los días del año.

Es indudable que los factores meteorológicos juegan un papel importante en el proceso natural de polinización y fertilización, tanto en los pinos como en todas las especies vegetales, entre las que destacan la humedad de la atmósfera y la temperatura. Durante ambos experimentos se mantuvo una humedad relativa alta ($95 \pm 3\%$), así como una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, dentro de las tres cámaras de fumigación, simulando condiciones naturales favorables, con el fin de no alterar el proceso de germinación y crecimiento del tubo polínico.

En experimentos previos se observó que a medida que disminuía la humedad relativa y se incrementaba la temperatura, los resultados eran negativos; es decir, el porcentaje de germinación se reducía y el crecimiento del tubo polínico se inhibía. Con una humedad relativa de 54% y una temperatura de 30°C no se detectó crecimiento del tubo polínico ni germinación de los granos de polen, después de 143 horas continuas (Hernández, Cox y Bauer. Datos no publicados).

Respecto a las localidades, es obvio que en aquellas con mayor concentración de ozono, los problemas potenciales en la capacidad germinativa y en el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen serán mayores, lo que repercutirá no sólo en la regeneración natural del bosque de pino, sino también en todos aquellos procesos fisiológicos, genéticos y de reproducción.

Posiblemente cuando los granos de polen están germinando y emitiendo su tubo polínico, manifiestan la mayor sensibilidad al ozono; sin embargo, debido al poco intercambio de gases con el ambiente (McWilliam, 1960), quizá se reduce dicho efecto. Tampoco se sabe si antes de la polinización pudiera ocurrir un impacto sobre el polen, ya que en la mayoría de los pinos el desarrollo completo de las flores masculinas dura aproximadamente un año (Niembro-Rocas, 1986).

Asimismo, no sólo los granos de polen podrían ser afectados por el ozono, sino también las flores femeninas, antes, durante y después de la polinización. Bramlett *et al.* (1977) mencionaron que se requiere de 12 a 16 meses, de acuerdo con la especie de pino, para que el tubo polínico se alargue y fertilice al óvulo, tiempo suficiente para que las concentraciones de ozono afecten negativamente la formación de la semilla de *P. hartwegii* de la CACM.

Es muy probable que los cambios en los procesos reproductivos sean complejos, puesto que involucran a la gametogénesis y los eventos reproductivos posteriores. Consecuentemente, uno de los efectos directos parece ser una reducción en la viabilidad del polen y, por lo tanto, en la eficiencia reproductiva (Cox, 1988, 1989 y 1992).

En la CACM, además de las altas concentraciones de ozono que se registran a diario, existen otros factores, tales como las royas y la sequía, que también intervienen negativamente en el proceso normal de la fecundación y formación de la semilla en los bosques de pino y otras especies forestales. Los resultados obtenidos en el presente estudio revelan que el ozono es un factor importante, ya que reduce en gran medida la capacidad germinativa de los granos de polen, fenómeno que se ha observado en diversas especies de pino de otros países (Benoit *et al.*, 1988; Cox, 1988).

En las áreas de interés existe una pobre o nula regeneración natural de los bosques de *P. hartwegii* debido a causas tan comunes como el sobre-pastoreo, los incendios, la colecta excesiva de semilla, la tala ilegal de los mejores árboles, el combate ineficiente de plagas y enfermedades forestales y la falta de un plan estratégico de manejo forestal. Además, la escasa regeneración natural en los bosques de *P. hartwegii* podría deberse también a un desfase entre la producción del polen y la receptividad de las flores femeninas, fenómeno de posible origen climático.

Bajo condiciones experimentales, bastan seis días consecutivos para que se reduzca significativamente el porcentaje de germinación y sólo tres días para reducir el crecimiento del tubo polínico. Por lo tanto, y de acuerdo con los resultados obtenidos, se confirma que ocurre un impacto negativo del ozono sobre los granos de polen de *P. hartwegii* de la CACM, específicamente sobre la germinación y el crecimiento del tubo polínico.

CONCLUSIONES

Los granos de polen de *P. hartwegii* son afectados por el ozono con la misma intensidad, sin importar la localidad o elevación del sitio de procedencia.

La aplicación de 0.30 ppm de ozono durante tres horas diarias por un periodo de seis días consecutivos redujo significativamente ($P \leq 0.05$) la germinación de 79 a 45% y el crecimiento del tubo polínico de 133 a 93 μ . En los granos de polen de *P. hartwegii* tratados. En contraste, la aplicación de 0.30 ppm de ozono, por tres horas diarias en un periodo de tres días consecutivos, fue suficiente para reducir significativamente el crecimiento del tubo polínico de 133 a 91 μ . A mayor tiempo de exposición y concentración de ozono se observó un daño más severo sobre la germinación y el crecimiento del tubo polínico de los granos de polen de *P. hartwegii* de la Cuenca Atmosférica de la Ciudad de México.

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar un experimento para determinar el impacto del ozono sobre la producción y distribución del polen de las especies forestales mexicanas

más importantes. Además, se recomienda llevar a cabo otros experimentos, donde se evalúe la germinación y el crecimiento del tubo polínico diariamente, en todo el período de fumigación con ozono, con el objeto de evitar una posible recuperación de los granos de polen.

AGRADECIMIENTOS

Al M. C. Ignacio Benítez Riquelme un sincero agradecimiento por sus comentarios y sugerencias en el análisis estadístico y discusión de resultados.

REFERENCIAS

- Bauer, L. I. de y T. Hernández-Tejeda. 1986. Contaminación: Una amenaza para la vegetación en México. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 84 p.
- Benoit, L. F., J. M. Skelly, L. D. Moore and S. Dochinger. 1983. The influence of ozone on *Pinus strobus* L. pollen germination. Can. J. For. Res. 13:184-187.
- Bramlett, D. L., E. W. Belcher, G. L. DeBarr, G. D. Hertel, R. P. Karrfalt, C. W. Lantz, T. Miller, K. D. Ware and H. O. Yates. 1977. Cone analysis of southern pines: a guidebook. GTR SE-13. USDA-Forest Service. Southern Forest Experiment Station, Asheville, NC. USA. 28 p.
- Brewbaker, J. L. and B. N. Kwack. 1963. The essential role of calcium ion in pollen germination and pollen tube growth. American Journal of Botany 50:859-869.
- Cox, R. M. 1983. Sensitivity of forest plant reproduction to long range transported air pollutants: *In vitro* sensitivity of pollen to simulated acid rain. New Phytologist 95:269-276.
- Cox, R. M. 1985. Determination of the sensitivity of pollination processes of different forest flora species to simulated rain. Report for the Canadian Forest Service. Contract Serial Number OSc81-00083. University of Toronto. Toronto, Canada. 44 p.
- Cox, R. M. 1987. The response of plant reproductive processes to acidic rain and other air pollutants. *In*: Hutchinson, T. C. and K. M. Meema. (Eds). Effects of atmospheric pollutants on forests, wetlands and agricultural ecosystems. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Germany. pp. 155-170.
- Cox, R. M. 1988. The sensitivity of pollen from various coniferous and broad-leaved trees to combinations of acidity and trace metals. New Phytologist 109:193-201.
- Cox, R. M. 1989. Natural variation in sensitivity of reproductive processes in some boreal forest trees to acidity. *In*: Scholds, F., R. Gregorious and D. Rudin. (Eds). Genetic effects of air pollutants in forest tree populations. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, Germany. pp. 77-88.

- Cox, R. M. 1992. The effects of wet deposition chemistry on reproductive processes in two species: apparent pollination effectiveness in relation to species pollen sensitivity. *Water, Air, and Soil Pollution* 62:213-226.
- Feder, W. A. 1968. Reduction in tobacco pollen germination and tube elongation, induced by low levels of ozone. *Science* 160:1122.
- Feder, W. A. and F. Sullivan. 1969. Differential susceptibility of pollen grains to ozone injury. *Phytopathology* 59:399.
- Harrison, B. H. and W. A. Feder. 1974. Ultrastructural changes in pollen exposed to ozone. *Phytopathology* 64:257-258.
- INEGI. 1999. Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y área metropolitana 1999. Talleres Gráficos del INEGI. Aguascalientes, México. 231 p.
- Kormutak, A., J. Salaj and B. Vookova. 1994. Pollen viability and seed set of silver fir (*Abies alba* Mill.) in polluted areas of Slovakia. *Silvae Genetica* 43:68-73.
- McWilliam, J. R. 1959. Effect of temperature on pollen germination of *Pinus* and its bearing on controlled pollination. *Forest Science* 5:10-17.
- McWilliam, J. R. 1960. Pollen germination of *Pinus* as affected by the environment. *Forest Science* 6:26-39.
- Miller, P. R., L. I. de Bauer, A. Quevedo and T. Hernández-Tejeda. 1994. Comparison of ozone exposure characteristics in forested regions near Mexico City and Los Angeles. *Atmospheric Environment* 28:141-148.
- Miller, P. R., L. I. de Bauer and T. Hernández-Tejeda. 2002. Oxidant exposure and effects on pine forests in the Mexico City and Los Angeles, California air basins. In: Fenn, M. E., L. I. de Bauer, and T. Hernández-Tejeda (Eds). *Urban Air Pollution and Forests: Resources at Risk in the Mexico City Air Basin*. Ecological Studies 156. Springer-Verlag. New York, USA. pp. 225-242.
- Mirov, N. T. 1969. The genus *Pinus*. Ronald Press Co. New York, US. 413 p.
- Mumford, R. A., H. Lipke, D. A. Laufer and W. A. Feder. 1972. Ozone-induced changes in corn pollen. *Environ. Sci. Technol.* 6:427-430.
- Niembro-Rocas, A. 1986. Mecanismo de reproducción sexual en pinos. Editorial Limusa. México. 130 p.
- Smith, W. H. 1981. Air pollution and forests: Interactions between air contaminants and forest ecosystems. Springer-Verlag, New York, USA. 379 p.
- Wolters, J. H. B. and M. J. M. Martens. 1987. Effects of air pollutants on pollen. *The Botanical Review* 53:372-414.

CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE *Pinus greggii* Engelm. EN RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN

Ana Rita Román Jiménez¹, J. Jesús Vargas Hernández¹,
Gustavo Adolfo Baca Castillo², Antonio Trinidad Santos²,
Manuel Pomoso Alarcón Bustamante³

RESUMEN

Con el fin de analizar bajo condiciones de invernadero los efectos directos y las interacciones de los tres nutrimentos principales: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) sobre el desarrollo de *Pinus greggii*, se utilizó el diseño "San Cristóbal" para generar funciones de crecimiento representadas mediante superficies de respuesta. Además, las variables altura, diámetro y biomasa aérea, radical y total se usaron para calcular los índices morfológicos que estimarán la calidad de planta. Los resultados indicaron que los nutrimentos por sí solos, son menos importantes que las interacciones entre ellos y que esta relación nutrimental dinámica afecta de manera significativa la morfología de las plantas, especialmente, en lo que se refiere a la acumulación y distribución de biomasa. El valor obtenido para los índices de calidad (índice de calidad de Dickson y el índice de esbeltez) fue pobre, debido a la presencia de un gran crecimiento aéreo con respecto al radical, originado por concentraciones excesivas de uno u otro nutrimento. En particular, las concentraciones altas de nitrógeno estimularon el crecimiento de la parte aérea. Fue evidente, entonces, que el balance nutrimental es primordial para el desarrollo de las plántulas en la etapa de vivero y que es necesaria la realización de estudios sobre regímenes y dosis de cada nutrimento, que permitan determinar el óptimo fisiológico y operativo para *P. greggii*.

Palabras clave: Calidad de planta, diseño San Cristóbal, fertilización de plántulas, funciones de crecimiento, índices de calidad de planta, *Pinus greggii*.

Fecha de recepción: 10 de febrero de 1999.

Fecha de aceptación: 10 de febrero de 2004.

¹ Colegio de Postgraduados. Programa Forestal. Km. 36.5 Carr. Fed. México-Texcoco, Montecillo 56230 México. aritacolpos@yahoo.com; vargashj@colpos.mx

² Colegio de Postgraduados. Especialidad en Edafología. bacag@colpos.mx y trinidad@colpos.mx

³ Campo Experimental La Campana-Madera. CIRNOC - INIFAP. malarconbustamante@yahoo.com

ABSTRACT

The "San Cristóbal" design was used in seedlings of *Pinus greggii* growing in nursery conditions, to analyze the direct effects and the interaction effects of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in their growth and development in this condition. The data obtained from the development of seedlings were used in growth functions and represented in surface responses. In addition, the height, diameter, and shoot, root and total biomass were used to construct morphological indexes which are helpful to estimate seedling quality. Results showed that nutrients effects are less important than the interactions between them, and the dynamic nutrient relationship significantly affects seedling morphology, especially biomass accumulation and distribution. The values obtained for the quality indexes (Dickson and thinning) were poor, mainly because of an excessive shoot growth over root growth due to an excess in one nutrient or another, specially the high concentration of nitrogen, which promote the shoot growth. It was evident than nutrient balance is a key issue on nursery seedling development, thus, it is advisable to conduct experiments assessing single-nutrient doses and regimes in search for both physiological and operational optimum for *P. greggii*.

Key words: Seedling quality, San Cristobal design, seedling fertilization, growth functions, seedling quality indexes, *Pinus greggii*.

INTRODUCCIÓN

La velocidad de remoción del arbolado en los bosques, debida a extracción o a cambios en el uso del suelo, excede la capacidad de repoblación natural en la mayoría de los sitios forestales. Los programas de reforestación han sido la respuesta a este problema, de modo que en la actualidad se cuenta ya con algunas técnicas y procedimientos estandarizados para la producción de plantas en los viveros de México. Sin embargo, la supervivencia es el asunto clave en la reforestación y hasta hace algunos años, no se consideraba este aspecto crítico en los sistemas de producción de los viveros, los cuales deben garantizar, en la medida de lo posible, cada vez mayores porcentajes de establecimiento en campo, con individuos vigorosos, capaces de tolerar el estrés asociado al trasplante y de mantener una tasa de crecimiento adecuada en el sitio de plantación (Duryea, 1985).

Cada vez es más frecuente el uso de fertilizantes en los sistemas de producción de planta forestal en México, bajo la premisa de que un régimen de nutrición correcto mejora su calidad y favorece su nivel de desempeño en condiciones de campo (Duryea y McClain, 1984; Landis, 1985). A pesar de ello, no se han desarrollado procedimientos y rutinas de fertilización particulares para cada especie y se desconoce, en la mayoría de ellas, su efecto en el crecimiento de las plántulas.

La sobre aplicación de fertilizantes, además de implicar mayores costos, puede tener efectos tóxicos o provocar un desequilibrio en el crecimiento con efectos negativos o perjudiciales en la mayoría de los casos (Duryea y McClain, 1984; Landis *et al.*, 1989; Bigras *et al.*, 1996). Al contrario, una dosis balanceada, o con los requerimientos apropiados de nutrimentos para cada especie, mejorará la morfología y fisiología de las plantas de acuerdo con los estándares establecidos en cada vivero (Cano *et al.*, 1998).

A partir de la caracterización morfológica se generan índices o relaciones que estiman la calidad de la planta, mediante un valor numérico fácil de obtener; ejemplo de tales relaciones son la razón parte aérea/raíz, el coeficiente de robustez, y el índice de calidad de Dickson (Duryea y Landis, 1984).

Pinus greggii Engelm. se ha convertido en una de las especies predilectas de los viveristas en México debido a sus características de crecimiento (Cano *et al.*, 1998; Salazar *et al.*, 1999), variabilidad genética y adaptabilidad (Ramírez *et al.*, 1997; López-Ayala *et al.*, 1999), tolerancia a la sequía y a otras condiciones adversas (Vargas, 1985), además de que su tasa de crecimiento en altura se mantiene en toda la amplitud de su distribución natural, aún al ser desplazada hacia sitios relativamente alejados de sus fuentes de producción de semilla (Eguiluz, 1978; Cano *et al.*, 1998; López-Ayala *et al.*, 1999; Salazar *et al.*, 1999). Para el manejo de *P. greggii* en vivero se tienen rutinas estandarizadas bajo diferentes sistemas, que incluyen el uso de contenedores de plástico en condiciones de invernadero (Cano *et al.*, 1998). No obstante, los regímenes de fertilización utilizados son adecuados para esta especie y sí favorecen la aparición rápida de características deseables de crecimiento.

Con base en lo anterior, este trabajo tuvo como objetivo identificar los efectos directos (individuales) y la interacción de los tres principales nutrimentos nitrógeno, fósforo y potasio (NPK) sobre el crecimiento inicial de *P. greggii* en condiciones de invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del estudio

El estudio se llevó a cabo en el área de invernaderos del Colegio de Postgraduados, Campus México, en Montecillo, Edo. de Méx., durante los meses de septiembre de 1997 a mayo de 1998, cuyas naves son estructuras con paredes y techo de cristal; tienen ventanas móviles para permitir la ventilación y regular la humedad ambiental, y el piso está cubierto con roca volcánica porosa (tezontle). La temperatura se mantuvo entre 12 y 32°C con la intención de reducir la fluctuación en algunos días muy calurosos, se regó el piso de la nave durante 30 a 45

minutos. Además, todos los días se abrieron las ventanas por la mañana y se cerraron al anochecer.

Las plantas procedieron de semilla colectada en 1994 en la localidad de "El Piñón", en el estado de Hidalgo. El lote consistió en una mezcla de diferentes árboles de esta población. Antes de sembrar, las semillas se remojaron en agua durante 48 hrs. La siembra se realizó en contenedores cónicos de plástico negro de 90 cc, a una profundidad de 0.5 cm; los envases fueron llenados previamente con sustrato hasta 2.5 cm del borde, se dejó un espacio suficiente para aplicar 10 cc de riego. La mezcla de "peat-moss" utilizada se considera inerte, ya que consistió en "peat-moss", vermiculita y perlita en proporción volumétrica 3:1:1; a pesar de que el primero es de origen orgánico, el período de evaluación no fue suficiente para que el medio de crecimiento hiciera una aportación significativa de nutrimentos. Para prevenir daños por hongos se aplicó Captán-50 durante las primeras diez semanas, en solución de 2.5 g L⁻¹ una vez por semana.

Diseño de tratamientos y soluciones nutritivas

Se utilizó un diseño factorial incompleto denominado "Diseño San Cristóbal", que fue desarrollado para investigación cañera en México a partir de trabajos clásicos sobre diseños incompletos (Box y Wilson, 1951; Rojas, 1962; Martínez, 1988), para reducir el número de tratamientos en los experimentos de fertilización que involucran tres o más factores, con la especial bondad de permitir una aproximación eficiente a la búsqueda del óptimo económico mediante superficies de respuesta (Martínez, 1988), sin la necesidad de incluir todas las posibles combinaciones de tratamientos de un diseño factorial completo, lo que aumentaría en gran medida el tamaño del experimento.

A pesar de la reducción en el número de tratamientos, la combinación de los factores permite una representación multidimensional de los mismos. En el caso del presente estudio la representación del diseño es tridimensional, ya que el experimento involucra tres factores (Figura 1).

Los factores representados en los ejes son: en el eje X presión osmótica (P_o) que expresa directamente la absorción de fósforo (P), en el eje Y la concentración de nitrógeno (N); y en el eje Z la concentración de potasio (K), de manera que los tratamientos representados son 12. Cada punto corresponde a la conjunción de tres de los cuatro niveles de factores incluidos en el diseño (0, 1, 2 y 3). El tratamiento 8 con dos niveles de cada factor es el centroide (2-2-2) del experimento.

Se debe recordar que el diseño San Cristóbal es un factorial incompleto, por lo tanto, sus principales desventajas son el no ser ortogonal y sus consecuentes

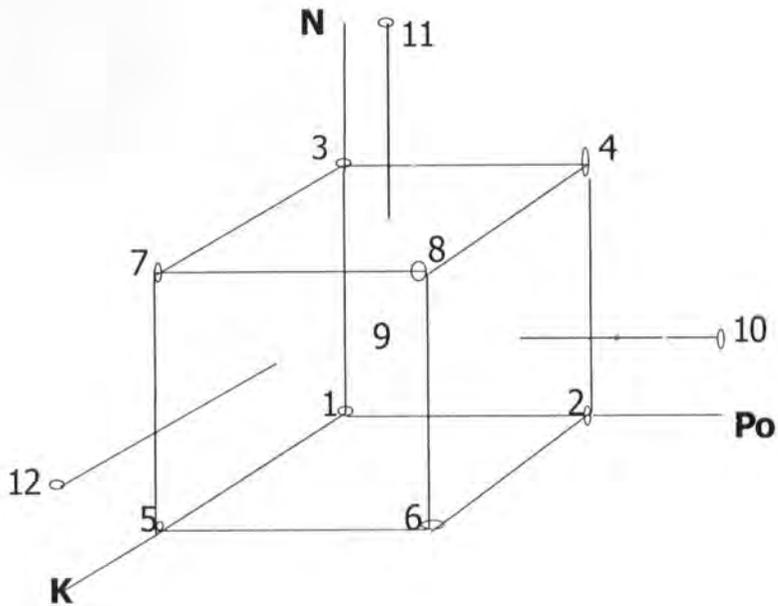


Figura 1. Cubo de tratamientos del "Diseño San Cristóbal" con tres factores de variación.

posibilidades de sesgo. En cambio, sus principales virtudes son: a) el número óptimo de tratamientos; es decir, el mínimo necesario para cumplir el objetivo del análisis de los efectos individuales de cada factor y sus interacciones; y b) su mayor poder de precisión en los estimadores, característica en la que supera ampliamente a las Matrices Plan Puebla II y III y a otros diseños factoriales incompletos como el diseño Box-Myers, el diseño Box, el Cuadrado Doble y el Cuadrado Doble modificado de Escobar (Turrent y Laird, 1975).

Las soluciones nutritivas se prepararon *ex professo* para cumplir con las características del presente estudio y en condiciones de balance osmótico total en el Laboratorio de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados (Cuadro 1). En estas mezclas de sales, el factor fósforo (P) estuvo implícito en el factor presión osmótica (Po), bajo el supuesto de que su aplicación en la planta induce un diferencial osmótico que favorece su absorción; de tal forma que la

concentración absorbida es directamente proporcional a los valores de presión osmótica; es decir, al aumentar la P_o , mayor absorción de fósforo.

Cuadro 1. Soluciones nutritivas con sus niveles y concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) en meq L^{-1} y ppm^\dagger , y fósforo asociado al potencial osmótico (P_o) en atm, utilizadas como tratamientos de nutrición en el experimento[‡].

Tratamientos	N			Po			K	
	Nivel	meq L^{-1}	ppm	Nivel	p.o.(atm)	Nivel	meq L^{-1}	Ppm
1	0	6	42	0	0.36	0	1	18
2	0	6	84	2	0.72	0	1	39
3	2	12	84	0	0.36	0	1	18
4	2	12	168	2	0.72	0	1	39
5	0	6	42	0	0.36	2	7	137
6	0	6	84	2	0.72	2	7	273
7	2	12	84	0	0.36	2	7	137
8	2	12	168	2	0.72	2	7	273
9	1	9	94	1	0.54	1	4	117
10	1	9	158	3	0.90	1	4	195
11	3	15	158	1	0.54	1	4	117
12	1	9	94	1	0.54	3	10	293

[†] meq L^{-1} = miliequivalentes por litro de agua; ppm = partes por millón; y atm = atmósferas de presión.

[‡] Para generar la presión osmótica requerida la composición química definitiva de las soluciones nutritivas está expresada en partes por millón.

El tratamiento 8 es la Solución de Steiner (Steiner, 1961) la cual posee una relación equivalente de aniones (N) y cationes (K); los demás tratamientos son desigualdades iónicas basadas en ella, donde el efecto fisiológico de una dosis absoluta cambia en relación con el potencial osmótico (Steiner, 1984).

Estas soluciones se elaboraron en las cantidades adecuadas (soluciones madre) para ser diluidas posteriormente con agua destilada en recipientes de 30 L.

La aplicación de las soluciones nutritivas se realizó por separado, para cumplir con las concentraciones previstas; a cada planta se le adicionaron 10 ml. por ocasión. El inicio del experimento fue cinco semanas después de la fecha de siembra, con una periodicidad semanal durante la época fría (octubre a febrero) y cada 48 hrs. a partir de marzo, hasta el final del estudio. De manera complementaria a los tratamientos de fertilización, se hicieron riegos con agua destilada en función de las condiciones ambientales del invernadero y necesidades de las plantas. Pese a que se utilizó agua destilada para minimizar la alteración en las concentraciones de los nutrimentos agregados con los tratamientos de fertilización, es necesario mencionar que en condiciones económicas óptimas (sin limitaciones económicas) todos los riegos deberían proporcionarse con solución nutritiva.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco repeticiones. El factor de bloques fue la velocidad de germinación de las semillas, definida con base en el número de días para la emergencia de las plántulas que considera el posible efecto del vigor, aunque también, puede deberse a variaciones microambientales. En el bloque uno se incluyeron los individuos que crecieron primero (entre los 11 y los 17 días después de la siembra) y así sucesivamente hasta el bloque cinco, el cual comprendió las plántulas que emergieron al final (entre los 25 y 29 días posteriores a la siembra). El factor de bloques tuvo como propósito reducir, en lo posible, las diferencias en el tamaño inicial de las plántulas y separarlas del efecto de las soluciones nutritivas. Cada bloque estuvo constituido por 12 parcelas (soluciones nutritivas), la unidad experimental fue de 30 plantas, para un total de 1800.

El modelo matemático derivado del "Diseño San Cristóbal" es una función de regresión que obedece a un factorial selectivo del tipo p factores, cada uno en cuatro niveles equidistantes. Si los niveles son 0, 1, 2 y 3, las combinaciones elegidas entre todas las posibles son: a) un factorial completo del tipo 2^p donde se ubican los niveles 0 y 2 de cada factor (N , P_0 y K); b) el punto central (nivel 1 de los tres factores) y los p puntos axiales (3,1,1), (1,3,1), y (1,1,3); esto se expresa como:

$$Y = b_0 + b_1n + b_2p_0 + b_3k + b_4n^2 + b_5p_0^2 + b_6k^2 + b_7np_0 + b_8nk + b_9p_0k$$

Donde:

Y = La característica que se desea estimar en función de N , P_0 y K

b_0 = La ordenada al origen; la estimación de Y debida al nivel 0 de cada factor ($N = P_0 = K = 0$);

b_1 , b_2 y b_3 estiman los efectos lineales de N , P y K , respectivamente

b_4 , b_5 y b_6 estiman los efectos cuadráticos respectivos

b_7 , b_8 y b_9 estiman las interacciones de primer orden entre los factores

No existen en este modelo interacciones de segundo orden

Antes de modelar matemáticamente el crecimiento y la producción de biomasa de las plantas, se efectuó un análisis de varianza y la prueba de comparación de medias de Tukey, para identificar en forma tradicional las diferencias existentes entre los tratamientos con $p \leq 0.05$. A continuación se utilizó el modelo general de regresión descrito arriba como base para crear distintas funciones de respuesta con el procedimiento GLM del paquete estadístico Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1985), para explicar el efecto de las soluciones nutritivas sobre el crecimiento y la producción de biomasa de las plantas.

A partir de este modelo general se evaluaron las funciones que representaron las combinaciones de sólo efectos lineales, efectos lineales con interacciones, efectos cuadráticos con interacciones y lineales con efectos cuadráticos con interacciones, de acuerdo al procedimiento descrito por Rojas (1979). Se seleccionaron sólo aquellas funciones que presentaron diferencias estadísticas significativas en un nivel $\alpha \leq 0.5$, para cada característica de crecimiento evaluada.

De este modo, en las funciones nutrimentales resultantes no se interpreta el crecimiento de las plantas como respuesta a un tratamiento, sino a cada nutrimento probado en forma lineal y cuadrática, y a la combinación de ellos en sus interacciones. Este análisis matemático modeló la variación tridimensional explorada por el diseño de tratamientos, y se representó con superficies de respuesta que permitieron visualizar con facilidad el comportamiento de las plantas a las interacciones nutrimentales (Martínez, 1988).

VARIABLES EVALUADAS

Se realizaron tres mediciones del crecimiento: la primera a los cuatro meses de edad a partir de la siembra (22 de enero de 1998); la segunda a los seis meses (25 de marzo de 1998); y la última a los ocho meses y medio de edad (22 de mayo de 1998). En cada ocasión se hizo un muestreo destructivo con seis de las 30 plantas de cada parcela; es decir, se eliminaron 360 individuos en cada fecha de evaluación, por lo que el remanente final fue de 720 plantas. En este documento se presentan y discuten los resultados obtenidos al final del estudio, luego de ocho meses y medio de crecimiento.

Las variables evaluadas en cada ocasión fueron: la altura de planta, el diámetro del tallo y la biomasa aérea, radical, y total. A partir de estas se estimaron el

índice de esbeltez, la relación parte aérea/raíz y el índice de calidad de Dickson. La altura se midió en centímetros, desde el borde del contenedor hasta la yema apical. El diámetro del tallo se midió en milímetros, en el borde del contenedor, con un vernier digital Mitutoyo, con aproximación a 0.001 mm. La biomasa aérea (tallo + hojas), radical y total se obtuvo en gramos, después de secar las muestras en estufa hasta peso constante (70° durante 72 hrs.). El peso se determinó con una balanza analítica con precisión a miligramos.

El índice de esbeltez se calculó mediante el cociente de la altura entre el diámetro del tallo. Se denominó de esta manera debido a que en el sistema actual de los viveros en México, las plantas producidas en contenedores cónicos o bloques de unicel son en general altas y delgadas (Cano *et al.*, 1998). Este índice es otra forma de referirse al cociente de robustez, llamado así porque a menores valores del índice las plantas son más robustas (Thompson, 1985). La relación parte aérea/raíz se estimó como el cociente adimensional entre la biomasa aérea (g) y la biomasa radical (g). El Índice de Calidad de Dickson (ICD) resultó de integrar los valores de biomasa total, el índice de esbeltez y la relación parte aérea/raíz, del modo siguiente:

$$ICD = \frac{\text{Biomasa total (g)}}{\frac{A \text{ (cm)}}{D \text{ (mm)}} + \frac{\text{Biomasa aérea (g)}}{\text{Biomasa radical (g)}}}$$

Donde:

A = altura

D = diámetro

En esta relación, los valores grandes del índice indican plantas de mejor calidad (Thompson, 1985).

Además de las variables anteriores, también se determinó el contenido de nitrógeno total (N), fósforo (P) y potasio (K) en porcentaje del peso del tejido vegetal (hojas), en cinco muestras de 0.5 g, para cada uno de los 12 tratamientos (n = 60). Para el caso del N se utilizó el método Kjeldahl (Bremen, 1965) y para los contenidos de P y de K un espectrómetro de emisión atómica de acoplamiento inducido por plasma (ICP-AES), marca Liberty, modelo Varian II. Munter y Grande (1981) describieron ampliamente el principio de funcionamiento de este equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las soluciones nutritivas afectaron de manera significativa el crecimiento de las plantas. La presencia de diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0.05$)

entre tratamientos se utilizó sólo como referencia para la generación de las funciones de crecimiento y producción de biomasa en respuesta a los factores de fertilización (Cuadro 2).

Cuadro 2. Altura, diámetro, producción de biomasa (biomasa aérea, radical y total) y relación parte aérea/raíz a los 8.5 meses de edad en plántulas de *Pinus greggii* Engelm., fertilizadas con diferentes tratamientos de nutrición.

Tratamientos [†]	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Biomasa aérea (g)	Biomasa de raíz (g)	Biomasa total (g)	RPA/R [‡]
1	18.99 d [§]	1.656 c	0.555 b	0.170a	0.725a	3.26
2	22.06abcd	1.859 bc	0.719ab	0.182a	0.902a	3.95
3	21.73abcd	1.841 c	0.672ab	0.172a	0.845a	3.90
4	21.92abcd	1.815 c	0.686ab	0.153a	0.839a	4.48
5	20.85 cd	1.691 c	0.594ab	0.158a	0.752a	3.76
6	24.37ab	2.070ab	0.747a	0.200a	0.948a	3.73
7	21.60 bcd	1.860 bc	0.645ab	0.169a	0.814a	3.82
8	24.92a	2.149a	0.695ab	0.171a	0.866a	4.06
9	22.27abc	1.845 bc	0.663ab	0.176a	0.840a	3.77
10	21.46 bcd	1.850 c	0.676ab	0.172a	0.848a	3.93
11	22.14abcd	1.837 bc	0.674ab	0.150a	0.824a	4.49
12	21.94abcd	1.862 bc	0.689ab	0.163a	0.853a	4.23

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]RPA/R = relación parte aérea/raíz; [§]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

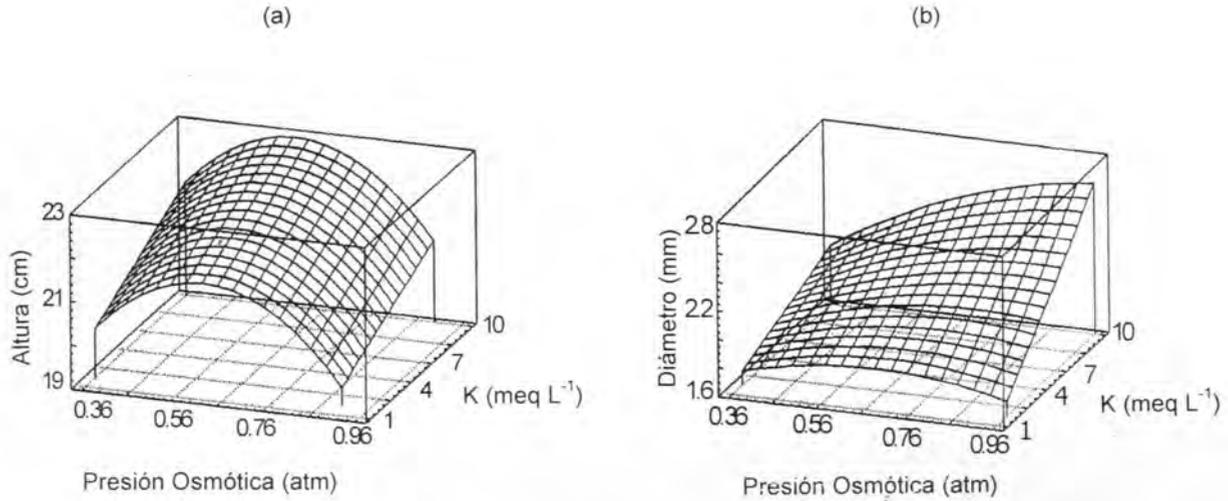
Crecimiento en altura y en diámetro

La diferencia en altura a los ocho meses y medio de crecimiento estuvo relacionada con los efectos lineal y cuadrático de la presión osmótica de las soluciones nutritivas y el efecto lineal del potasio (Figura 2a). Como puede observarse, el crecimiento en altura respondió en proporción directa al efecto de la presión osmótica de la solución nutritiva hasta un punto situado entre los niveles 2 y 3 del factor (0.54 a 0.72 atm), que es la región de la superficie de respuesta donde se aprecia la mayor expresión del crecimiento; valores inferiores o superiores de presión osmótica ocasionaron efectos menores. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Steiner (1984), quien demostró que la presión osmótica es el factor más importante en la respuesta de las plantas a las soluciones nutritivas.

El crecimiento en altura se relacionó de manera lineal con el contenido de potasio de la solución, por lo que se esperaba que su concentración mínima de potasio ($1 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$) produjera plantas con menor altura y con la máxima (10 meq L^{-1}) fueron más altas. Sin embargo, debido a la presión osmótica la mayor altura, casi 25 cm, se obtuvo con la concentración de $7 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$ a 0.72 atm de P_o ; este resultado fue 25% superior al obtenido con $1 \text{ meq L}^{-1} \text{ K}$, el cual produjo plántulas de 19 cm de altura.

Un potencial osmótico elevado en la raíz es un requisito para la turgencia, el transporte de solutos y el balance de agua en las plantas, los que en principio son responsables de la extensión celular. Además, el potasio es el soluto inorgánico más importante en esos procesos, por lo que la extensión celular de tallos y hojas está muy relacionada con los niveles de potasio (Marschner, 1990). Esto coincide con los datos del presente trabajo y contribuye a la opinión de que el potasio es un nutrimento importante para el alargamiento celular y en definitiva para el crecimiento general de las plantas.

Con respecto al diámetro del tallo, nuevamente la presión osmótica y su interacción con el potasio determinaron el crecimiento (Figura 2a-b). El diámetro del tallo manifestó su máxima expresión (2.15 mm), a una presión osmótica de 0.54 a 0.72 atm; por arriba de esta región no se presentaron incrementos significativos en diámetro lo que puede explicarse a partir de lo citado por Steiner (1984), quien señaló que la mayoría de los cultivos soportan las concentraciones iónicas totales de las soluciones nutritivas hasta límites fisiológicos particulares y, si se rebasan dichos límites, las plantas ya no responden en crecimiento, debido a sobredosis o a deficiencia en los nutrimentos. No obstante, hasta la fecha no existe información para otras especies del género *Pinus* fertilizadas con soluciones de las que se conozca su contenido iónico real que corroboren el efecto antes descrito.



$$\text{Altura} = 13.074 + 27.231(Po) + 0.167(K) - 22.650(Po)^2$$

$$R^2 = 0.283$$

$$\text{Diámetro} = 1.344 + 1.467(Po) - 1.316(Po)^2 + 0.114(Po \cdot K)$$

$$R^2 = 0.402$$

Figura 2a. Crecimiento en altura (a) y diámetro (b) de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (Po) y al potasio (K) de las soluciones nutritivas.

El diámetro del tallo también respondió en forma lineal a las concentraciones de potasio en las soluciones aplicadas, (Figura 2a-b). Aunque, a diferencia de la altura, la concentración máxima de potasio (10 meq L^{-1}) si ocasionó el mayor diámetro en las plantas; los valores mayores se obtuvieron con los tratamientos 8 y 6 (ambos con 7 meq L^{-1} de K y 0.72 atm de Po). El diámetro del tallo en estos tratamientos fue 23% superior al alcanzado en el tratamiento 1 (1 meq L^{-1} de K y 0.36 atm de Po), que a su vez fue el menor con $2.11 > 1.65 \text{ mm}$. Al respecto, Dralle y Larsen (1995) determinaron en individuos adultos de *Picea abies* (L.) Karst, que la fertilización con fósforo y potasio provocó incrementos en diámetro de hasta 100%, mientras que los niveles de nitrógeno no tuvieron ningún efecto importante sobre el crecimiento en diámetro de *P. abies*.

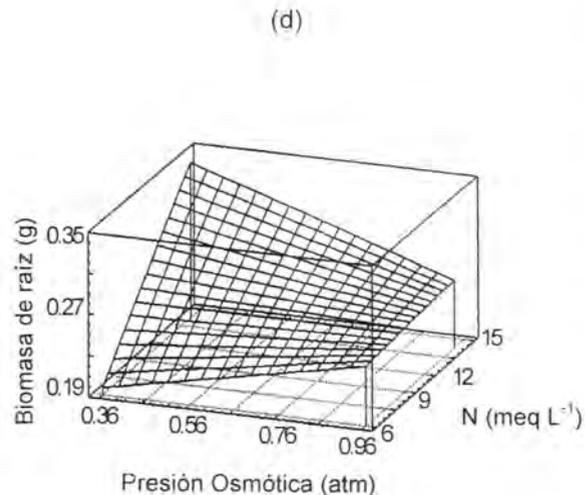
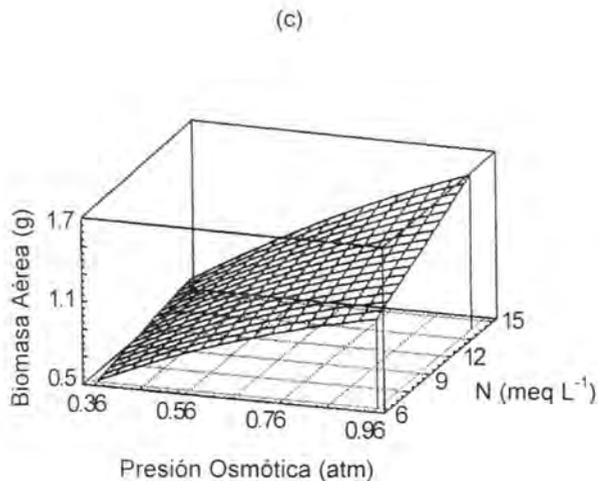
En este estudio, el diámetro alcanzado por las plantas a los ocho meses y medio de edad es 17% menor al esperado para la especie en la mayoría de los viveros tecnificados de México ($2.11 < 2.51 \text{ mm}$), según lo consignado por Cano *et al.* (1998). Al relacionar esos resultados con el trabajo de Dralle y Larsen (1995) se puede señalar que a pesar del efecto benéfico del potasio, el aumento en la presión osmótica resultó un factor adverso para el crecimiento en diámetro (Figura 2a-b).

Dado que la absorción de fósforo está relacionada con el nivel de presión osmótica y que tanto el fósforo como el potasio tienen un efecto positivo sobre el diámetro, se esperaría una relación directa entre la presión osmótica y el diámetro. Los resultados, sin embargo, no confirman esta respuesta, por lo que es necesario investigar con mayor detalle la relación entre presión osmótica y absorción de fósforo en especies forestales.

Producción de biomasa

La mayor acumulación de biomasa aérea se logró con el tratamiento 6 y la menor con el tratamiento 1; en este caso, los efectos más importantes y significativos ($p \leq 0.01$) fueron la presión osmótica y el nitrógeno (Figura 2b-c). La biomasa aérea producida con bajas concentraciones nutrimentales y la menor presión osmótica de la solución (0.36 atm) fue de sólo 0.555 g , y la obtenida con concentraciones intermedias y la presión osmótica de 0.72 atm fue de 0.747 g , 35% más que la anterior.

Aparentemente, según la función de respuesta, deberían utilizarse soluciones con presión osmótica alta, ya que estimulan la producción de biomasa aérea. Sin embargo, los tratamientos no permitieron explorar la zona de máxima respuesta producida por el modelo (15 meq L^{-1} de N y 0.90 atm de Po), por lo que no existen datos que apoyen este comportamiento; además la biomasa de la parte aérea no es lo único importante, ya que debe existir un balance apropiado con la biomasa de raíz, según los requerimientos del sitio de plantación.



$$\text{Biomasa aérea} = -0.0044 + 1.5402(Po) - 0.7017(Po)^2 + 0.059(Po \cdot N); R^2 = 0.257$$

$$\text{Biomasa de raíz} = 0.0285 + 0.2350(Po) + 0.0239(N) - 0.0253(Po \cdot N); R^2 = 0.262$$

Figura 2b. Producción de biomasa aérea (c) y de raíz (d) de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (Po) y al nitrógeno (N) de las soluciones nutritivas.

Los resultados del estudio muestran que la composición de las soluciones nutritivas son una herramienta útil para manipular el balance entre la biomasa aérea y la radical en plantas de *Pinus greggii*, hecho que coincide con otras coníferas (Van den Driessche, 1992). Las actividades en vivero podrían incluir o combinar la fertilización con la poda aérea, que ha resultado una acción importante en la modificación de la respuesta fisiológica de las plantas, a nivel de redistribución de carbohidratos (Cetina *et al.*, 2001) sobre todo al aumentar la formación de raíces (Cetina *et al.*, 1999). El conjunto de estas prácticas contribuye a optimizar el balance entre la parte aérea y las raíces, con los requerimientos de los sitios de plantación.

La interacción de la presión osmótica con el nitrógeno tuvo un efecto significativo sobre la biomasa de raíz (Figura 2b-d). Con base en la superficie de respuesta, los mayores valores de biomasa radical se obtendrían combinando la menor presión osmótica (0.36 atm) y el mayor nivel de nitrógeno (15 meq L⁻¹); aunque en el ensayo no se incluyó dicho tratamiento. Si se observa la Figura 2b-d, el incremento en la presión osmótica (Eje X) eleva la biomasa de raíces sólo si se utiliza el mínimo de nitrógeno en la solución nutritiva.

Por otro lado, la biomasa radical aumenta en forma importante con la concentración de N (Eje Z), cuando se utilizan los valores mínimos de presión osmótica en la solución. Sin embargo, los tratamientos incluidos en el ensayo no exploraron completamente la variación representada en la superficie de respuesta; por lo que en el tratamiento 6 se alcanzó el mayor valor de biomasa de raíces (0.200 g), seguido del tratamiento 2 con 0.182 g. En ambos casos debe notarse que, de acuerdo con los valores esperados de la función de respuesta, el nivel de nitrógeno es mínimo (6 meq L⁻¹) pero el valor de presión osmótica (0.72 atm) no es el máximo. Esto es importante porque la fertilización en vivero tiene efectos contrastantes en la producción de biomasa aérea y de raíces.

Se ha comprobado que las fórmulas con mayor concentración de nutrimentos inhiben el crecimiento radical (Van den Driessche, 1992); este efecto, en particular del nitrógeno, se ha observado también en clones de híbridos del género *Populus* (Friend *et al.*, 2000).

Relación parte aérea/raíz

La relación parte aérea/raíz (RPA/R) obtenida con las soluciones nutritivas (Cuadro 2) fueron muy superiores al máximo de 2.5 recomendado tradicionalmente (Thompson, 1985) y son inconvenientes desde el punto de vista de calidad de las plantas. El criterio de calidad con base en esta característica es que la parte aérea sea lo más cercano posible a la biomasa de la raíz (RPA/R ≈ 1), porque esto puede garantizar una mayor supervivencia en campo, al evitar que

la transpiración de la parte aérea exceda a la capacidad de absorción de agua por las raíces (May, 1984).

Los resultados indican que todos los tratamientos aplicados promovieron más el crecimiento aéreo de las plantas que el de las raíces. Duryea y Landis (1984) citan que la fertilización, presenta un efecto similar, estimula más el crecimiento de la parte aérea que el de la raíz. Los tratamientos 4 (RPA/R = 4.48) y 11 (RPA/R = 4.49) fueron muy superiores (80%) a los valores recomendados para otras especies de coníferas (Thompson, 1985), pero aún son 32% menores que los registrados para la misma especie en el sistema de viveros tecnificados en México (Cano *et al.*, 1998).

El modelo de la relación parte aérea/raíz (RPA/R) evidencia que la interacción entre los niveles de presión osmótica (P_o) y de nitrógeno (N) de las soluciones nutritivas fue el factor determinante (Figura 3). Es interesante destacar que la superficie de respuesta obtenida muestra que la RPA/R disminuye ligeramente conforme aumenta el nivel de nitrógeno, y esta pérdida es mayor en el menor nivel de presión osmótica; lo que difiere de lo propuesto por Landis *et al.* (1989), quienes mencionan que a mayores niveles de nitrógeno la relación parte aérea/raíz por lo general se incrementa. Sin embargo, de nuevo, esos extremos

$$\text{Relación parte aérea/raíz} = 2.3535 + 4.8871(P_o) - 0.0935(N) \text{ con } R^2 = 0.328.$$

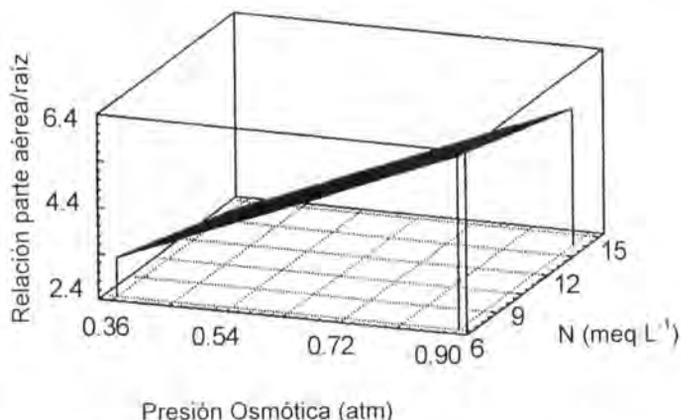


Figura 3. Relación parte aérea/raíz (RPA/R) en plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a la presión osmótica (P_o) y al nitrógeno (N) de la solución nutritiva.

de la superficie de respuesta no fueron explorados por los tratamientos de este trabajo, por lo que no existe evidencia concluyente.

Contenido nutrimental en la planta

El contenido de nitrógeno en la parte aérea de las plantas presentó diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.01$) entre tratamientos, con valores que variaron entre 2.62 y 3.66%, como sucede en otros cultivos en medios hidropónicos (Cuadro 3). Estas concentraciones son superiores a las recomendadas por Youngberg (1984) y Duryea y McClain (1984), autores que han establecido como óptimo un contenido entre 1.7 y 2.2%. El tratamiento 5 propició una concentración de nitrógeno 34% mayor que el promedio de los niveles definidos como óptimos, mientras que los tratamientos 4, 8 y 10 excedieron en 80% ese valor.

Las soluciones preparadas provocaron un exceso de nutrición en las plantas (sobrefertilización), además de que la absorción de los nutrimentos no estuvo en proporción directa a la concentración de las soluciones, como por ejemplo en los tratamientos 5, 7 y 10 para el potasio, y el 2, 6 y 11 para el nitrógeno (Cuadros 1 y 3). Lo anterior hace evidente la necesidad de considerar cuidadosamente las interacciones nutrimentales que ocurren al manipular concentraciones de elementos en soluciones nutritivas. En el futuro si se quiere modelar el efecto nutrimental sobre otras especies forestales será necesario ensayar dosis más bajas de nitrógeno y conceder atención a las de fósforo y potasio.

En lo que respecta al fósforo, la mayor concentración (0.23%) en el tejido vegetal se presentó en el tratamiento 1 y la menor (0.15%) en el 4. Al igual que en el caso del nitrógeno, la acumulación de fósforo en los tejidos tampoco estuvo relacionada en forma directa con el nivel de presión osmótica de los tratamientos. Por ejemplo, en el tratamiento 10, con la presión osmótica más alta (0.90 atm) se observó una absorción total de 1.22 mg de fósforo, mientras que en los tratamientos 2, 4 y 6, donde el potencial osmótico fue menor (0.72 atm), la absorción de fósforo varió entre 1.03 y 1.41 mg (Cuadros 1 y 3).

De nuevo, los resultados indican que la concentración absoluta de un elemento en la solución nutritiva no es determinante en el crecimiento de las plantas; la respuesta final depende más de la concentración de un elemento dado con las concentraciones de los otros nutrimentos en la solución, que en conjunto definen el potencial osmótico de ésta.

Como se discutió en el caso del nitrógeno, los datos sugieren que el balance nutrimental en las soluciones nutritivas genera respuestas distintas en el crecimiento, como se ha demostrado en otras especies forestales (Van den Driessche, 1980; Ritchie, 1984). Esto se refleja en el tratamiento 1, el cual se

Cuadro 3. Contenido total (mg) y porcentaje (%) de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en la parte aérea de plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a diferentes soluciones nutritivas.

Tratamientos [†]	N		P		K							
	(mg)	%	(mg)	%	(mg)	%						
1	15.87	c [‡]	2.86	bc	1.28	a	0.23	a	9.69	d	1.75	cd
2	23.58	ab	3.28	abc	1.30	a	0.18	ab	11.80	cd	1.64	cd
3	20.43	abc	3.04	abc	1.19	a	0.18	ab	10.65	cd	1.58	cd
4	23.46	ab	3.42	ab	1.03	a	0.15	b	10.46	cd	1.52	d
5	15.56	c	2.62	c	1.13	a	0.19	ab	10.36	d	1.74	cd
6	21.51	ab	2.88	abc	1.41	a	0.19	ab	17.92	ab	2.40	abc
7	20.12	abc	3.12	abc	1.17	a	0.18	ab	14.55	bcd	2.26	bcd
8	25.44	a	3.66	a	1.30	a	0.19	ab	19.59	ab	2.82	ab
9	19.23	bc	2.90	abc	1.23	a	0.18	ab	14.90	bcd	2.25	bcd
10	23.25	ab	3.44	ab	1.22	a	0.18	ab	16.07	abc	2.38	abc
11	22.11	ab	3.28	abc	1.18	a	0.17	ab	14.57	bcd	2.16	bcd
12	19.98	bc	2.90	abc	1.35	a	0.19	ab	21.58	a	3.13	a

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

observó la mayor absorción relativa de fósforo (0.23%), coincide con las plantas de menor tamaño; es decir, hubo un efecto significativo de acumulación del elemento (P) en el tejido verde debido a su menor tasa de crecimiento, asociada probablemente al efecto indirecto de los otros elementos (N y K) en la solución nutritiva, cabe destacar que este tratamiento aportó las concentraciones menores de nitrógeno (6 meq L⁻¹) y potasio (1 meq L⁻¹), así como el menor nivel

de presión osmótica (0.36 atm) de todo el estudio (Cuadro 1) y fue el que originó la relación parte aérea/raíz más adecuada de todas (Cuadros 2 y 4).

Para el potasio la concentración promedio en el tejido vegetal fue de 2.14%, valor muy superior al sugerido como óptimo (1.0%) por Landis *et al.* (1989). Esta concentración también presentó diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) entre los tratamientos (Cuadro 3). En tanto que en el tratamiento 12 se obtuvo una concentración promedio de 3.13% de potasio, en el cuatro la concentración fue de sólo 1.52%, menos de la mitad que en el primero. A diferencia de lo que ocurrió con el nitrógeno (N) y el fósforo (P), en el potasio (K) si hubo tendencia a incrementar la absorción total del elemento, al aumentar su concentración en la solución nutritiva (Cuadros 1 y 3).

Indicadores de calidad de planta

Aunque los valores de la relación parte aérea/raíz encontrados en este estudio son muy superiores a los considerados adecuados en términos de calidad de planta, se incluyeron para mostrar gráficamente los efectos del desbalance nutricional originado por las soluciones nutritivas utilizadas.

El Cuadro 3 muestra que el menor valor promedio de la relación parte aérea/raíz (RPA/R) fue mayor que 3.0. En general para especies de coníferas la RPA/R óptima no debe sobrepasar un valor de 2.5 (Thompson, 1985); a pesar de ello, para *P. greggii* en un sistema de producción tecnificado en México fueron superiores a los de este estudio (Cano *et al.*, 1998). Lo más importante es hacer notar algunos excesos en las concentraciones elementales de las soluciones nutritivas, junto con el efecto multiplicativo de la presión osmótica sobre la absorción del nitrógeno y el potasio. Este comportamiento es claro en los tratamientos 4 y 11, en los que la relación parte aérea/raíz fue 4.5, seguidos por los tratamientos 12 y 8, con una relación mayor a 4.0 (Cuadro 4).

Cabe señalar que en dichos tratamientos la característica más evidente es la saturación de al menos uno de los nutrimentos estudiados: del potasio en el tratamiento 12, del nitrógeno en los tratamientos 4 y 11, y de ambos elementos (N y K) en el tratamiento 8. Por otra parte, el tratamiento 6 generó la máxima cantidad de biomasa de raíz (0.200g); pero debido al efecto de la presión osmótica, la biomasa aérea superó con mucho el crecimiento de la raíz, a pesar de la concentración moderada del nitrógeno utilizada en dicho tratamiento (Cuadro 2), a su vez, los contenidos de fósforo y potasio en el tejido verde de las plantas fueron relativamente altos (Cuadro 3) y se obtuvo el "mejor" índice de calidad de Dickson (ICD) (Cuadro 4).

Los valores promedio del índice de esbeltez y del índice de calidad de Dickson (ICD) muestran el desbalance en el crecimiento de las plántulas (Cuadro 4). El

Cuadro 4. Relación parte aérea/raíz, índice de esbeltez e índice de calidad de Dickson (ICD) en plantas de *Pinus greggii* a los 8.5 meses de edad, en respuesta a diferentes soluciones nutritivas.

Tratamientos [†]	Relación parte aérea/raíz	Índice de esbeltez	Índice de calidad de Dickson
1	3.27 b [‡]	11.48 a	0.0492 a
2	3.97 ab	11.84 a	0.0571 a
3	3.90 ab	11.83 a	0.0537 a
4	4.50 a	12.07 a	0.0506 a
5	3.77 ab	12.31 a	0.0468 a
6	3.85 ab	11.75 a	0.0608 a
7	3.85 ab	11.62 a	0.0526 a
8	4.09 ab	11.56 a	0.0553 a
9	3.77 ab	12.08 a	0.0530 a
10	3.94 ab	11.59 a	0.0546 a
11	4.47 a	12.04 a	0.0500 a
12	4.21 a	11.77 a	0.0534 a

[†]Las concentraciones de nitrógeno (N) y potasio (K) y la presión osmótica (Po) de cada tratamiento se presentan en el Cuadro 1.

[‡]Valores en una columna seguidos por la misma letra son estadísticamente iguales.

índice de esbeltez es una medida de la morfología evidente de las plantas; define individuos altos y delgados, o bajos y robustos. Las plantas de *P. greggii* de este estudio, a los ocho meses y medio de edad corresponden a la primera categoría. Al parecer, el exceso de nitrógeno en las soluciones nutritivas favoreció el crecimiento en altura a expensas del crecimiento en diámetro y del crecimiento de la raíz, como ha sido citado en otras especies forestales (Brissette y Tiarks, 1990; Mishra y Chauhan, 1997). Debido a que las plantas esbeltas son más

susceptibles a los factores ambientales adversos (Sutton, 1979; Chavasse, 1980; Thompson, 1985), a partir de la evidencia proporcionada por los resultados sería necesario modificar el balance nutrimental de las soluciones para favorecer el crecimiento en diámetro, además de disminuir los umbrales máximos al momento de prepararlas.

Estudios realizados en otras especies indican que esto se puede lograr aumentando las concentraciones de fósforo (P) y potasio (K) al tiempo que se reduce la concentración de nitrógeno (Van den Driessche, 1980; Mishra y Chauhan, 1997; Mead *et al.*, 1998). Además el efecto del balance nutrimental sobre la relación parte aérea/raíz también puede depender de la época de aplicación de los fertilizantes y de la etapa de crecimiento de las plantas (Gleason *et al.*, 1990).

Al respecto existe evidencia de que aplicaciones frecuentes de concentraciones bajas de elementos, son más eficientes que concentraciones altas aplicadas una sola vez (Ingestad, 1982), y es necesario considerar que en las fórmulas comerciales, las cantidades en la etiqueta se refieren a los compuestos en los que se asimilan las formas elementales de los nutrimentos y no a sus concentraciones iónicas reales (Binkley, 1986).

Los valores del índice de calidad de Dickson observados en el estudio son muy bajos y bastante menores a los encontrados por Ritchie (1984) en *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, y en *Ulmus villosa* Brandis Ex. Gamble por Mishra y Chauhan (1997). Dado que el índice de calidad de Dickson combina la biomasa total de la planta con los dos índices anteriores (relación parte aérea/raíz e índice de esbeltez), los resultados obtenidos son lógicos, puesto que reflejan el desbalance en el crecimiento descrito en párrafos anteriores.

Las interacciones nutrimentales evidenciadas en el presente trabajo son razón suficiente para investigar más a fondo el cambio en la absorción de un nutrimento en presencia de otro, ya que la proporción de las concentraciones y su interacción con la época de crecimiento son factores muy dinámicos. Con relación a esto, Imo y Timmer (1997) determinaron en *Prosopis chilensis* (Mol.) Stuntz que cuando las dosis de fertilización se mantienen constantes, generalmente se ocasiona un efecto de dilución de los nutrimentos conforme crece la planta. Esto significa que para que la absorción sea efectiva, deben diseñarse regímenes de fertilización que modifiquen las concentraciones nutrimentales en función de la época y el ritmo de crecimiento, para lograr en todo el período de crecimiento un equilibrio entre las cantidades aplicadas de los nutrimentos y las absorbidas en el tejido verde de las plantas.

Con base en lo anterior, es obvio que las cantidades utilizadas en el estudio, diseñadas originalmente para especies agrícolas, que por lo regular tienen tasas

de crecimiento más elevadas que las especies leñosas, fueron excesivas para *Pinus greggii*. Debido a la falta de información existente sobre las necesidades nutrimentales de las especies forestales de México en condiciones de vivero, es importante tomar en cuenta los resultados obtenidos para diseñar un régimen de fertilización dinámico para las condiciones específicas de producción de planta en vivero. Las funciones de respuesta generadas son una primera aproximación en la búsqueda de una combinación óptima de nutrimentos, tanto desde el punto de vista fisiológico, como operativo para *P. greggii*.

CONCLUSIONES

Las concentraciones nutrimentales de las soluciones nutritivas tuvieron efectos importantes en el desarrollo de las plantas en todas las características evaluadas, sobre todo en cuanto a la acumulación y la distribución de biomasa.

Las concentraciones elevadas de nitrógeno estimularon en exceso el crecimiento de la parte aérea, por lo que los parámetros de calidad de planta fueron inferiores a los estándares establecidos para la producción de planta en México.

Las interacciones nutrimentales tuvieron mayor influencia que los elementos por sí solos, lo que indica que la absorción es dinámica y depende del balance entre nutrimentos y los patrones de crecimiento de las plantas. El factor principal que condicionó los niveles de absorción nutrimental fue la presión osmótica de la solución nutritiva.

Los resultados de este estudio representan una primera aproximación al análisis del balance nutrimental en especies forestales en condiciones de vivero y plantean la necesidad de explorar dosis específicas de fertilización en la búsqueda de concentraciones nutrimentales óptimas para lograr un equilibrio fisiológico y operativo en la producción de planta de *Pinus greggii*.

REFERENCIAS

- Bigras F. J., A. Gonzalez, A., L. D'aoust y C. Hebert. 1996. Frost hardiness, bud phenology and growth of containerized *Picea mariana* seedlings grown at three nitrogen levels and three temperature regimes. *New Forests* 12: 243-259.
- Binkley, D. 1986. *Forest Nutrition Management*. Wiley-Interscience Pub. John Wiley & Sons. New York, NY. 290 p.
- Box G. E. P., and K. B. Wilson. 1951. On the experimental attainment of optimum conditions. *Jour. Roy. Stat. Soc. Series B.* 13:1-45
- Bremen J., M. 1965. Total nitrogen. *In*: Black, C., A. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part. 2.* Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, WI., USA. pp.1149-1178.

- Brissette J., C. y A., E. Tiarks. 1990. Nitrogen fertilization affects the partitioning of dry matter growth between shoots and roots of loblolly pine nursery stock. *In*: Coleman S., S. y D.G. Neary (Eds.) Proceedings of the 6th biennial Southern silvicultural research conference. USDA, For. Serv. Southeastern For. Exp. Sta., Gen. Tech. Rep. 70. Asheville, NC. pp: 108-114.
- Cano P., A., J. J. Vargas, H., V. A. González, H., G. Vera, C. y V. M. Cetina, A. 1998. Caracterización morfológica de plántulas de *Pinus greggii* Engelm. en dos sistemas de producción en vivero. *Ciencia Forestal en México* 23 (84):19-27.
- Cetina A., V. M., V. A. González, H. y J. J. Vargas, H. 1999. El manejo en vivero de *Pinus greggii* Engelm., y la calidad de planta. *Agrociencia* 33 (4):423-430.
- Cetina A., V. M., M. L. Ortega, V. A. González, H., J. J. Vargas, H., M. T. Colinas, L. y A. Villegas, M. 2001. Fotosíntesis y contenido de carbohidratos de *Pinus greggii* Engelm., en respuesta a la poda y al régimen de riego en vivero. *Agrociencia* 35 (6):599-607.
- Chavasse, C. G. R. 1980. Planting stock quality: a review of factors affecting performance. *New Zealand J. For.* 25: 144-171.
- Dralle, K. y J. B. Larsen. 1995. Growth response to different types of NPK-fertilizer in Norway spruce plantations in Western Denmark. *Plant and Soil* 168-169: 501-504.
- 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 tests. For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA. pp: 1-4.
- Duryea, M. L. y T. D. Landis (Eds.). 1984 *Forest Nursery Manual. Production of bareroot seedlings.* Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. For. Res. Lab., OSU. Corvallis, OR. USA. 385 p.
- Duryea, M. L. y K. M. McClain, 1984. Altering seedling physiology to improve reforestation success. *In*: Duryea, M. L. y G. N. Brown (Eds.) *Seedling physiology and reforestation success.* Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, Boston, USA. pp: 77-114.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos del género *Pinus* en México. Tesis Profesional. Departamento de Bosques. Universidad Autónoma Chapingo. México. 446 p.
- Friend, A. L., J. A. Mobley, E.A. Ryan y H. D. Bradshaw, Jr. 2000. Root growth plasticity of Hybrid Poplar in response to soil nutrient gradients. *J. Sust. For.* 10 (1/2):133-140.
- Gleason, J. F., M. L. Duryea, R. Rose y M. Atkinson. 1990. Nursery and field fertilization of 2 + 0 ponderosa pine seedlings: the effect on morphology, physiology, and field performance. *Can. J. For. Res.* 20: 1766-1772.
- Imo, M. and V. R. Timmer. 1997. Vector diagnosis of nutrient dynamics in

- Mesquite seedlings. *For. Sci.* 43 (2): 268-273.
- Ingestad, T. 1982. Relative addition rate and external concentration: driving variables used in plant nutrition research. *Plant, Cell and Environment* 5:443-453.
- Landis, T. D. 1985. Mineral nutrition as an index of seedling quality. *In*: Duryea, M. L. (Ed.), *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests*. *For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA*. pp: 29-48.
- Landis, T. D., R. W. Tinus, S. E. McDonald and J. P. Barnett. 1989. Seedlings Nutrition and Irrigation, Vol. 4. *The container tree nursery manual, Agric. Handbook*. 674. Washington, D.C.; USDA Forest Service. 119 p.
- López-Ayala, J. L., J. J. Vargas, C. Ramírez H. y J. López U. 1999. Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento del brote terminal en *Pinus greggii* Engelm. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 5 (2):133-140.
- Marschner, H. 1990. *Mineral nutrition of higher plants*. Institute of Plant Nutrition, University Hohenheim, Federal Republic of Germany, Academic Press. 674 p.
- Martínez G., A. 1988. *Diseños experimentales. Métodos y Elementos de Teoría*. Ed. Trillas. México, D. F. pp: 329-404.
- May, J. T. 1984. Nutrients and fertilization. *In*: May, J.T., E. W. Belcher Jr., C. E. Cordell, T. H. Filer Jr., D. South, and C. W. Lantz (Eds.). *Southern pine nursery handbook*. USDA Forest Service, Southern Region, USA. pp: 12-41.
- Mead, D. J., A. Zaidi y K. Chakrabarti. 1998. Fertilizer applications for growing *Cryptomeria japonica* and *Pinus patula* container seedlings. *Indian Forester* 124: 179-183.
- Mishra, V. K. y S. K. Chauhan. 1997. Response of N and P fertilizers on *Ulmus villosa* seedlings. Morphological indices and fertilizer response function. *Indian, J. For.* 20: 74-77.
- Munter, R. C. and R. A. Grande. 1981. Plant tissue and soil extract analysis by ICP-atomic emission spectrometry. *In*: Barnes, R. M. (Ed.). *Developments in Atomic Plasma Spectrochemical Analysis*. Heyden and Son Ltd., London, England. pp: 653-672.
- Ramírez H., C., J. J. Vargas, H., J. Jasso, M., G. Carrillo, C. y H. Guillén, A. 1997. Variación isoenzimática en diez poblaciones naturales de *Pinus greggii* Engelm. *Agrociencia* 31 (2): 223-230.
- Ritchie, G. A. 1984. Assessing seedling quality. *In*: Duryea, M. L. y T. D. Landis (Eds.). *Forest Nursery Manual: Production of bareroot seedlings*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers. *For. Res. Lab., OSU, Corvallis, OR, USA*. pp: 243-259.
- Rojas, B. A. 1962. The "San Cristóbal" design for fertilizer experiments. *Proc. of the Int. Soc. of Sugarcane Technologists* 11:197-203.

- Rojas, B. A. 1979. Análisis estadístico del diseño San Cristóbal. Temas Didácticos No. 7. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. SARH. México, D. F. 17 p.
- Salazar G., J. G., J. J. Vargas, H., J. Jasso, M., J. D. Molina, G., C. Ramirez, H. y J. López, U. 1999. Variación en el patrón de crecimiento en altura de cuatro especies de *Pinus* en edades tempranas. Madera y Bosques 5 (2):19-34.
- Statistical Analysis System Institute Inc. 1985. User's Guide: Basics. Ver. 5.0 SAS Institute, Inc. Cary, N.C., U.S.A. pp: 959-966.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solution of a certain desired composition. Plant and Soil XV (2):134-154.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. In: Proceedings of the 6th International Congress on Soilless Culture. ISOSC. Wageningen, The Netherlands. pp: 633-649.
- Sutton, R. F. 1979. Planting stock quality and grading. For. Ecol. Manage. 2: 123-132.
- 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 tests. For. Res. Lab. OSU, Corvallis, OR, USA. pp: 59-71.
- Turrent F., A. y R. J. Laird. 1975. La matriz experimental Plan Puebla para ensayos sobre prácticas de producción de cultivos. Agrociencia 19:117-143.
- Van den Driessche, R. 1980. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on Douglas-fir nursery growth and survival after planting. Can. J. For. Res. 10:65-70.
- Van den Driessche, R. 1992. Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. Can. J. For. Res. 22: 740-749.
- Vargas H., J. J. 1985. Respuesta a la sequía de cuatro especies de *Pinus* en estado de plántula. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. 94 p.
- Youngberg, C. T. 1984. Soil and tissue analysis: tools for maintaining soil fertility. In: Duryea, M. L. and T. D. Landis (Eds). Forest Nursery Manual: Production of bare-root seedlings. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Pub. For. Res. Lab. OSU. Corvallis, OR. pp: 75-80.

DURABILIDAD NATURAL EN ÁREA CEMENTERIO DE SIETE ESPECIES DE ENCINO DEL ESTADO DE GUANAJUATO

Luis Vázquez Silva¹, José Amador Honorato Salazar¹ y Francisco J. Zamudio Sánchez²

RESUMEN

Se evaluó la durabilidad natural y se determinó el tiempo de vida útil de la madera de albura de siete especies de encino del estado de Guanajuato mediante pruebas en un área cementerio, usando probetas de 19 mm (T) x 19 mm (R) x 500 mm (L). Las especies estudiadas fueron cinco del grupo de los encinos rojos: *Quercus castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. crassifolia*, *Q. durifolia* y *Q. laurina*, y dos de encinos blancos: *Q. obtusata* y *Q. rugosa*. Las probetas se evaluaron cada seis meses mediante los criterios establecidos en la norma ASTM D 1758. La falla de las probetas fue causada solamente por el ataque de hongos xilófagos. Se desarrolló un modelo de comportamiento del deterioro por medio de una ecuación matemática con los valores semestrales promedio y se derivaron varios indicadores. El tiempo de vida útil de las especies, en meses, determinado con el modelo, fue de 57.8 para *Q. castanea*, 59.2 para *Q. coccolobifolia*, 72.2 para *Q. crassifolia*, 56.4 para *Q. durifolia*, 58.8 para *Q. laurina*, 66.7 para *Q. obtusata* y 62.6 para *Q. rugosa*. Se propone un sistema de clasificación mediante el cual la durabilidad natural de *Q. castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. durifolia* y *Q. laurina* se califica como moderadamente resistente y la de *Q. crassifolia*, *Q. rugosa* y *Q. obtusata* como durable. Se considera un tiempo de 26 meses como el periodo máximo de uso de la madera en estado natural en contacto con el suelo, ya que en ese tiempo las probetas alcanzaron un nivel de degradación moderada, etapa en la que se estima que aun es posible tratar la madera, incrementando así su vida útil.

Palabras clave: Durabilidad natural, encinos, encinos blancos, encinos rojos, Guanajuato, pruebas en área cementerio.

Fecha de recepción: 04 de septiembre de 1998

Fecha de aceptación: 03 de febrero de 2004

¹ Campo Experimental San Martinito, C.I.R. Centro - INIFAP. Km. 56.5 Carretera Federal México-Puebla, Tlahuapan, Pue. Apdo. Postal No. 124, San Martín Texmelucan, 74000 Puebla. Correo-e: cesmar@compu-redes.net.mx

² Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales.

ABSTRACT

Natural durability was assessed and service life was determined in the sapwood of seven oak species using a graveyard test. Stakes of 19 mm (T) x 19 mm (R) x 500 mm (L) were used for this purpose. Five red oak species from Guanajuato State, Mexico, were studied: *Quercus castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. crassifolia*, *Q. durifolia* and *Q. laurina*, as well as two white oak species: *Q. obtusata* and *Q. rugosa*. The assessment of the stakes was carried out at intervals of six months and the criteria for assessing the attack was based on the ASTM D 1758 standard. The failure of the stakes was only due to the attack by fungi. The average six monthly decay performance values were modelled by a mathematical equation from which several indicators were derived. The service life in months for each species determined by the model was 57.8 for *Q. castanea*, 59.2 for *Q. coccolobifolia*, 72.2 for *Q. crassifolia*, 56.4 for *Q. durifolia*, 58.8 for *Q. laurina*, 66.7 for *Q. obtusata* and 62.6 for *Q. rugosa*. A proposed durability classification allowed to classify *Q. castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. durifolia* and *Q. laurina* as moderately durable and *Q. crassifolia*, *Q. rugosa*, and *Q. obtusata* as durable. Twenty six months was considered the maximum period of time to use natural timber in ground contact, since the stakes reached a moderate decay grade. It was regarded that at this stage it is still possible to preserve the timber, thus increasing its service life.

Keywords: Natural durability, oak, white oak, red oak, Guanajuato State, graveyard tests.

INTRODUCCIÓN

Persiste en México un conocimiento limitado sobre la resistencia o durabilidad natural de la madera de los encinos al ataque de hongos e insectos, a pesar de que en el país vegetan más de 150 especies (Martínez, 1981; Nixon, 1993), lo cual contribuye en parte a que su aprovechamiento y utilización sean restringidos. La diversidad botánica de los encinos define diferencias en las características y propiedades de la madera, lo que se refleja en su comportamiento al deterioro, que además varía entre las partes del árbol. La mayor durabilidad del duramen se atribuye a la presencia de sustancias tóxicas en cantidades considerables que previenen o minimizan el ataque de los organismos que causan el deterioro, en tanto que la madera de albura es más susceptible a la degradación debido a que no tiene suficiente cantidad de extractivos, o los que tiene, son de baja toxicidad para inhibir el crecimiento de los organismos. Otras sustancias, como las reservas alimenticias en las células del parénquima, aumentan la susceptibilidad al deterioro (Scheffer y Duncan, 1949; Scheffer y Cowling, 1966). Bajo las mismas condiciones

de uso, el grado de deterioro puede ser un 40% más rápido en la madera de albura que en la de duramen (Honorato *et al.*, 1999).

Es importante entender el comportamiento de durabilidad natural de la madera, ya que en condiciones de servicio está expuesta a los factores ambientales, físicos, mecánicos y químicos, así como a la acción de agentes biológicos que llegan a deteriorarla considerablemente. Los hongos e insectos xilófagos son los principales agentes responsables de grandes pérdidas económicas por la degradación y destrucción que causan en la madera, sobre todo en la destinada a la construcción o a usos en los que está en contacto directo con el suelo. Generalmente, en el uso de la madera en México no hay una separación de la madera de duramen y la de albura, ni tampoco se seleccionan las maderas con alta durabilidad natural; esto induce a utilizar indistintamente madera mezclada, en forma natural o tratada con preservadores, sin considerar si las condiciones del medio ambiente propician o no el ataque de organismos. En otras ocasiones, el uso de la madera y sus características de durabilidad se basan en la experiencia individual y en la reputación de su resistencia del ataque de organismos.

Los estudios de resistencia natural en encinos han sido llevados a cabo principalmente en condiciones de laboratorio (Gómez *et al.*, 1969; Salinas *et al.*, 1971; Herrera *et al.*, 1976, 1980; De la Paz y Salinas, 1977; Torelli y Cufar, 1994; Vázquez y Honorato, 1999), pero las experiencias no son suficientes para establecer la durabilidad natural de las especies, por lo que se debe investigar en campo, ya que la madera que está en contacto con el suelo se deteriora más rápidamente que aquella que no lo está. Esto probablemente obedezca al mayor contenido de humedad que la madera adquiere en dicha condición y a la abundancia de organismos presentes que causan su degradación (Behr, 1973).

Scheffer (1973) señala que de las especies estadounidenses nativas de encinos, solamente las del grupo de los encinos blancos resisten a la degradación causada por los organismos, por lo que se utilizan para la construcción de botes debido que este comportamiento se combina con su resistencia mecánica. Por su parte Honorato *et al.* (1999) indicaron que los encinos blancos del país tienen mayor durabilidad que los encinos rojos en condiciones de campo, comportamiento que coincide con los estudios llevados a cabo en laboratorio para las mismas especies por Vázquez y Honorato (1999). Asimismo, señalan que la madera puede emplearse en estado natural por un tiempo máximo de 21 meses, periodo en cual alcanza un grado de deterioro moderado y que aún es posible darle un tratamiento de preservación para aumentar su vida útil.

Dada la escasa información existente sobre la durabilidad natural de los encinos, se planteó un estudio en área cementerio que contribuyera a establecer bases para

seleccionar usos de la madera bajo condiciones favorables de su deterioro, al evaluar y determinar la durabilidad natural de *Quercus castanea* Neé, *Q. crassifolia* Humb & Bonpl., *Q. coccolobifolia* Trel., *Q. durifolia* Von Seem, *Q. laurina* Humb & Bonpl., *Q. obtusata* Humb & Bonpl. y *Q. rugosa* Neé, así como determinar el tiempo mínimo de degradación de la madera en estado natural, a partir del cual sea posible aplicar un tratamiento de preservación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron siete especies de encino, cinco rojos (*Quercus castanea*, *Q. crassifolia*, *Q. coccolobifolia*, *Q. durifolia* y *Q. laurina*) y dos blancos (*Q. obtusata* y *Q. rugosa*) de la parte sur y norte del estado de Guanajuato, en los predios de "El Agostadero", ejido de Puruagua, municipio de Jerécuaro y "El Potrero", ejido de Cieneguitas-San Bartolo, municipio de Guanajuato. Se seleccionaron dos árboles por especie y de cada uno se cortó una troza de 2.60 m de longitud a una altura de 1.5 m a partir del tocón. Cada troza se dividió en secciones de 0.60 m obteniendo de cada una de ellas barras de 2.5 cm (R) x 2.5 cm (T) de la madera de albura, las cuales se secaron en condiciones ambientales de interiores y después se dimensionaron a 19 mm (R) x 19 mm (T) x 500 mm (L).

La razón para elegir solamente la madera de albura fue su mayor susceptibilidad al ataque de organismos biológicos y su menor resistencia, que la de duramen. De esta manera se evalúa la resistencia mínima de las especies y dependiendo del tiempo que duren bajo condiciones de deterioro, se dispondrá de bases para decidir si se usa madera preservada o no. Se escogieron y etiquetaron con láminas de aluminio veinte barras libres de defectos de cada especie. Posteriormente, las probetas se mezclaron y se escogieron al azar por medio de una tabla de números aleatorios, se instalaron a una profundidad de 25 cm en las intersecciones de las hileras y columnas del área cementerio.

El área cementerio fue de 300 m², dividida en hileras y columnas, con espaciamentos de 30 cm entre hileras y 60 cm entre columnas. Su ubicación, condiciones climatológicas y características de suelo las describen Honorato *et al.* (1999). La toma de datos y la evaluación para el ataque de hongos y de insectos de las probetas se realizó a intervalos de seis meses por un período de 54 meses. La asignación del grado de deterioro se realizó de acuerdo con la clasificación que se describe en la norma ASTM D 1758 (ASTM, 1992). Para tal efecto, cada probeta se extrajo cuidadosamente del suelo y, al momento de determinar de modo visual el grado de deterioro de la parte que permaneció en contacto directo con el suelo, se flexionó ligeramente con ambas manos. Luego se colocó nuevamente en su lugar y a la misma profundidad, tratando de perturbar lo menos posible la interacción entre la probeta, el suelo, el hongo o bien el

insecto. La clasificación numérica relacionada con el grado de deterioro se señala en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación del grado de deterioro o ataque causado por hongos y/o insectos en la madera (ASTM, 1992).

Grado de deterioro	Deterioro o ataque	
	Condición	Evaluación
10	Sana	No hay ningún deterioro
9	Incipiente	Implantación del hongo o insecto
7	Moderado	Reblandecimiento del tejido leñoso o galerías superficiales
4	Severo	Presencia de pudrición, galerías profundas
0	Falla	Desintegración de la madera, galerías profundas y grandes huecos.

Los valores promedio del grado de deterioro de cada especie se ajustaron mediante el modelo matemático desarrollado por Honorato *et al.* (1999) al utilizar los diferentes indicadores descritos y derivados del modelo:

$$g(t) = at^2 + bt + c$$

Donde:

$g(t)$ = valor promedio del grado de deterioro en el tiempo t (meses)

a, b y c = los parámetros del modelo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El daño y degradación de la madera en condiciones de campo fueron causados por hongos xilófagos. Los valores promedio de deterioro a través del tiempo

para las diferentes especies se muestran en la Figura 1 donde se observa que la velocidad de deterioro es más lenta en *Quercus crassifolia* que en *Q. durifolia* y *Q. coccolobifolia*. Los valores promedio de deterioro, ajustados con el modelo, y sus indicadores calculados correspondientes permiten analizar con mayor detalle las diferencias entre las especies estudiadas (Cuadro 2, Figura 2):

El indicador (abc) de área bajo la curva puede considerarse como la capacidad total de deterioro de las especies bajo las condiciones ambientales y de suelo del lugar de estudio. Es de esperarse que esta capacidad cambiará de acuerdo con las condiciones de exposición. En zonas de clima tropical la capacidad total será menor, debido a que la humedad es más alta y durante mayor tiempo en el año y a que la diversidad de agentes biológicos es más grande, que en zonas de clima templado o árido. En el Cuadro 2 y la Figura 2, se observa que a medida que el área bajo la curva aumenta, el tiempo de falla (t) es mayor. En este caso, *Q. crassifolia* presenta el mayor tiempo de falla y el área más grande, mientras que *Q. durifolia* tiene los valores más bajos para ambos indicadores. Esto sugiere que la capacidad de resistencia de *Q. crassifolia* es mayor que la de *Q. durifolia*, así como del resto de las especies. Con base en estos indicadores, el orden ascendente de resistencia para las especies es: *Q. durifolia*, *Q. castanea*, *Q. laurina*, *Q. coccolobifolia*, *Q. rugosa*, *Q. obtusata* y *Q. crassifolia*. Los valores de tiempo de falla (t') obtenidos para *Q. laurina* y *Q. crassifolia*, son similares a los resultados de Honorato *et al.* (1999), aunque el tiempo de exposición fue menor en el presente estudio.

Otro indicador es la velocidad de cambio constante (vck), el cual se relaciona con la rapidez de deterioro y la susceptibilidad de resistencia inherente de degradación de la madera. Así, las especies que presentan una mayor velocidad de cambio decreciente se degradan más rápido y alcanzan un valor de deterioro moderado en menos tiempo. Tal es el caso de *Q. coccolobifolia*, que requirió de 26.3 meses para alcanzar este nivel de deterioro. Este resultado difiere del obtenido por Honorato *et al.* (1999), quienes señalan un tiempo de 21.8 meses; sin embargo, es importante considerarlo porque representa el tiempo mínimo en el que la madera alcanza un nivel de deterioro que aún permite darle un tratamiento de preservación, con lo que se alarga su vida útil de servicio. Lo anterior puede llevarse a cabo cuando por razones económicas no es posible invertir en madera preservada.

La velocidad instantánea de cambio ($vcit$) también influye en la rapidez de deterioro debido a que el nivel de degradación que se alcanza en un tiempo determinado se incrementa en periodos subsecuentes debido a que se combina con la resistencia inherente, por lo que se considerara como el grado de resistencia que puede tener la madera en un momento determinado. En el Cuadro 2, se

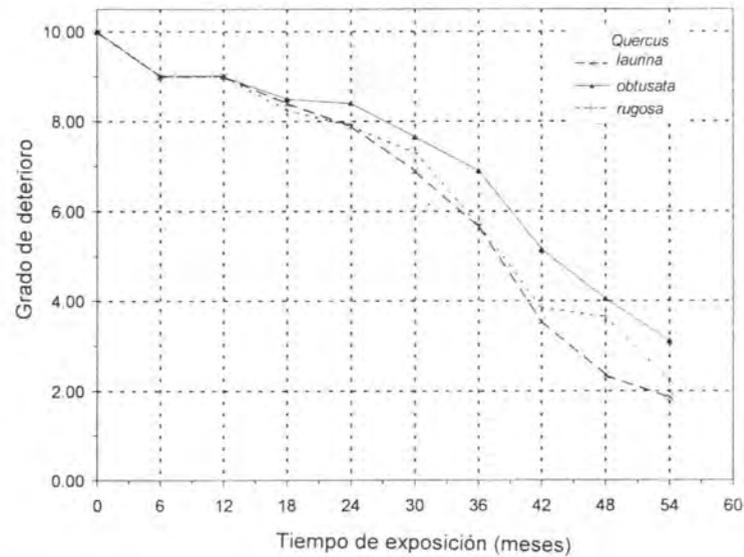
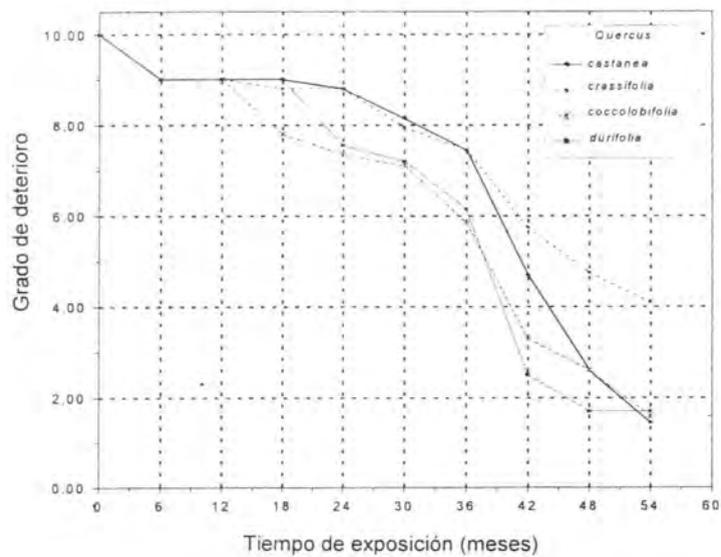
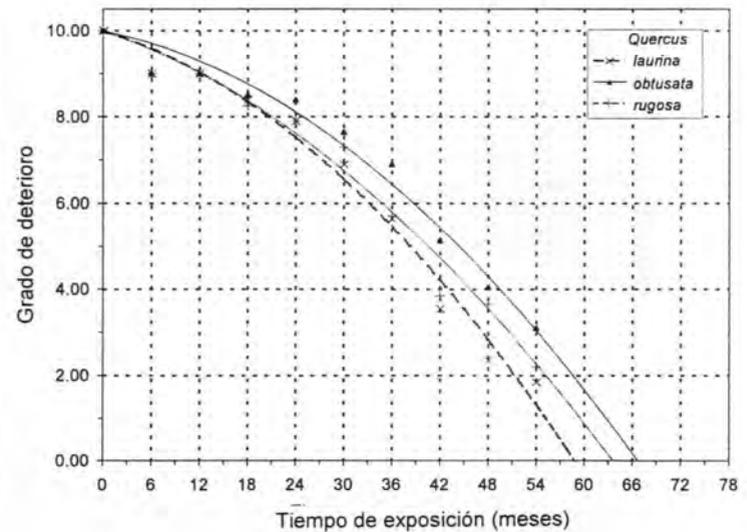
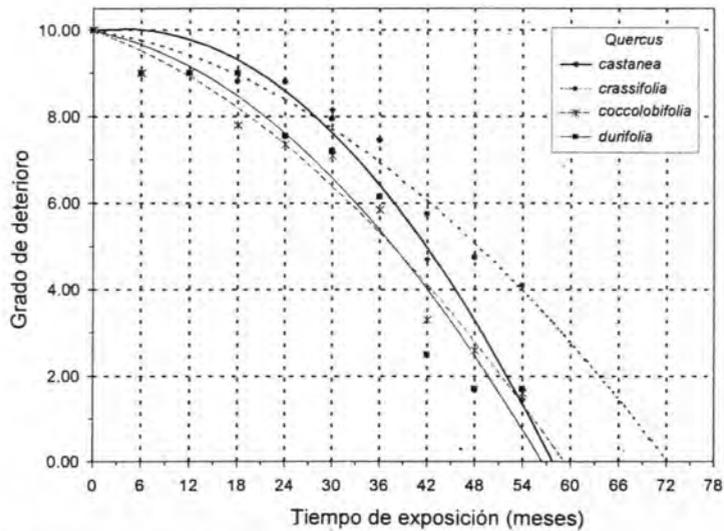


Figura 1. Grado de deterioro promedio en la madera de albura causada por hongos en área cementerio

Cuadro 2. Parámetros e indicadores calculados del modelo.

Especie	Parámetros				Indicadores Calculados								
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>f'</i>	<i>abc</i>	<i>Abct7</i>	<i>tp</i>	<i>t7</i>	<i>app</i>	<i>vcit</i>	<i>vck</i>	<i>vct7</i>	<i>vct7p</i>
<i>Quercus castanea</i>	-0.003379	0.022073	10	57.77	397.38	247.66	26.00	33.24	4.74	-0.00676	0.022073	-0.15363	141.52
<i>crassifolia</i>	-0.001487	-0.031240	10	72.17	454.02	240.73	18.96	35.62	7.41	-0.00297	-0.031240	-0.10856	100.00
<i>coccolobifolia</i>	-0.001673	-0.069796	10	59.22	353.99	226.61	11.49	26.35	12.84	-0.00335	-0.069796	-0.15679	144.43
<i>durifolia</i>	-0.002392	-0.042189	10	56.44	353.85	231.73	14.52	27.68	10.87	-0.00478	-0.042189	-0.16657	153.44
<i>laurina</i>	-0.001923	-0.056920	10	58.82	359.29	229.50	12.91	27.38	11.73	-0.00385	-0.056920	-0.15692	144.54
<i>obtusata</i>	-0.001668	-0.038792	10	66.67	415.72	237.12	16.58	32.35	8.80	-0.00334	-0.038792	-0.12553	115.63
<i>rugosa</i>	-0.001559	-0.062175	10	62.59	376.69	229.85	12.61	28.25	11.60	-0.00312	-0.062175	-0.14324	131.95



Símbolos = valores experimentales; líneas = valores ajustados.

Figura 2. Valores promedio de deterioro ajustados y tiempo de falla.

advierde que la menor velocidad inicial se presenta en *Q. castanea* y la mayor en *Q. crassifolia*, mientras que las otras especies tienen valores intermedios similares entre sí, situación que cambia con el tiempo. Cuando se toma en cuenta un período de 26 meses, estos valores son diferentes a los iniciales; en este caso, la velocidad es mayor para *Q. durifolia* y menor para *Q. crassifolia*. El resto de las especies presentan valores intermedios. Si se toma como referencia el valor mínimo de velocidad de cambio instantánea, es posible determinar que a los 26 meses el grado de resistencia de *Q. crassifolia* es de un 15% a un 53% mayor que el de las otras especies.

En condiciones de humedad y temperatura que no favorecen el ataque y desarrollo de organismos biológicos, la madera puede permanecer en su estado natural sin ser degradada por mucho tiempo y en términos de nivel de degradación tendrá un valor óptimo de 10, mostrando así una resistencia ideal que puede representarse como el área bajo la curva ideal (*ai*). Sin embargo, la madera en uso comúnmente está expuesta a condiciones que propician en mayor o en menor grado su deterioro. Así, en un tiempo específico de 26 meses, la resistencia al deterioro disminuye y el área bajo la curva (*abct7*) es menor que la ideal. Esta disminución se presenta como el área de pérdida porcentual (*app*). El valor mínimo de esta área; *app* = 4.7%, permite determinar el tiempo (*tp*) que necesitarían las otras especies para alcanzar un valor similar. Las especies que tengan un deterioro más rápido requerirán menos tiempo para alcanzar el valor de referencia y una pérdida mayor en área; es decir, las especies pierden su capacidad de resistencia más fácilmente y en un período más corto. Este comportamiento se observa en el Cuadro 2, por lo que es posible ordenar las especies en orden ascendente, de la siguiente manera: *Q. coccolobifolia*, *Q. rugosa*, *Q. laurina*, *Q. durifolia*, *Q. obtusata*, *Q. crassifolia* y *Q. castanea*.

Los diferentes indicadores señalan que el deterioro cambia para estas especies con el tiempo. En las primeras etapas de degradación, algunas especies son más resistentes que otras, como es el caso de *Q. castanea*, pero a medida que el nivel de degradación aumenta, su resistencia disminuye llegando a ser menos resistentes. Otras especies, como *Q. crassifolia*, *Q. obtusata* y *Q. rugosa*, presentan una degradación más uniforme. La diferencia empieza a ser evidente a los 24 meses de exposición y es más marcada a los 54 meses. De acuerdo con el análisis de varianza realizado al 5%, ocurre una diferencia significativa a los 24 meses entre *Q. castanea* y *Q. coccolobifolia*, mientras que a los 54 meses ésta se manifiesta entre *Q. castanea* y *Q. crassifolia*.

En general, todas las especies leñosas tienen una capacidad de resistencia o susceptibilidad inherente al deterioro, que están determinadas en gran medida por el arreglo estructural de sus diferentes elementos celulares y por su

composición química. Las especies que tienen mayor resistencia inherente tienden a resistir más el ataque de organismos biológicos y tardarán más en ser degradadas. Los encinos no son la excepción, por lo cual presentan diferencia en su nivel de deterioro observada a través del tiempo.

Los encinos se caracterizan por tener elementos de vaso con paredes celulares delgadas y grandes lúmenes. Estas estructuras proporcionan un acceso longitudinal fácil al ataque de organismos biológicos. Poseen rayos multiseriados compuestos de células parenquimatosas, que junto con las fibras, son los elementos más afectados por la degradación que causan los organismos. Sin embargo, aún dentro de los encinos existen diferencias entre los elementos celulares, que también influyen en su deterioro. Las especies de encinos blancos tienen mayor cantidad de tilides en sus elementos de vaso que los encinos rojos, y en ocasiones no se presentan en este último grupo (De la Paz y Aguilar, 1978). Asimismo, Honorato (datos no publicados), menciona que el diámetro de los elementos de vaso y el grosor de pared de las fibras son menores en los encinos blancos que en los rojos; esto da lugar a que la susceptibilidad al deterioro en sus tejidos y paredes celulares sea diferente, y que a su vez están correlacionadas con sus diferencias en composición química, principalmente en su contenido de lignina (Wilcox, 1973).

El ataque y la degradación de la madera causada por hongos xilófagos ocurre por el contacto entre las enzimas que segregan y el substrato leñoso que lo descomponen para utilizarlo como alimento. Sin embargo, dado que la madera es un sistema cerrado pero poroso, los hongos penetran la madera por medio de sus hifas por las vías que ofrecen menor resistencia, que son los elementos de mayores dimensiones con cavidades más extensas. Así, se ha observado que los hongos colonizan extensivamente los elementos de los vasos o rayos durante su ataque (Wilcox, 1973). Posteriormente, las hifas penetran entre las células a través de las punteaduras y destruyen las paredes celulares por medio de perforaciones, ya sea paralelas a las microfibrillas de la pared secundaria, o bien en dirección del lumen hacia la lamina media (Wilcox, 1973; Nilsson *et al.*, 1989; Eriksson *et al.*, 1990).

Las características estructurales de los encinos blancos hacen que resistan más la colonización de los hongos xilófagos y que su degradación sea menor, ya que al inicio del ataque, las tilides presentan una barrera para que las hifas penetren y difundan sus enzimas. A medida que este obstáculo se ve superado, el grado de deterioro se incrementa en una proporción similar, comportamiento que se observa en *Q. obtusata* y *Q. rugosa*, los cuales poseen abundantes tilides (De la Paz, 1976, 1985) y cuya resistencia es mayor que la de las demás especies, excepto *Q. crassifolia*.

Las manifestaciones de deterioro de las probetas indican que la madera fue atacada por hongos que causan la pudrición café, los cuales degradan principalmente los polisacáridos de la pared celular. Kirk y Cowling (1984), señalan que la descomposición de la madera por estos agentes está en función del contenido de lignina y su interrelación y unión química con los otros componentes que forman la pared celular. Este polímero muestra cierta resistencia al paso de las enzimas que fragmentan los polisacáridos; como resultado, los hongos necesitan más tiempo para superar la barrera de lignina y degradar la pared celular, retardando así el daño total. Otros compuestos químicos que influyen en el grado de deterioro son los extractivos, principalmente los taninos, que debido a su interacción molecular con las enzimas, disminuyen o inhiben el daño causado a la madera por hongos xilófagos (Hart y Hillis, 1972).

La mayor resistencia observada en *Q. crassifolia* podría atribuirse a la combinación del contenido de lignina y taninos. Esta especie tiene 21.4% de lignina y 1.52% de taninos (Honorato y Hernández, 1998). Y en contraste, *Q. durifolia*, tiene 22.5% y 0.78%, respectivamente (Bautista, 1999). Quizá el contenido de taninos sea de mayor relevancia y su menor proporción en esta última especie se manifiesta en una resistencia inferior.

Por otro lado, el tiempo de deterioro total ayuda a clasificar la durabilidad de las especies. Sin embargo, hay algunas diferencias entre las distintas tablas de clasificación actuales en cuanto al periodo de vida útil de una especie, para ser considerada en determinada clase de durabilidad natural. Findlay (1985), estimó que para las condiciones del Reino Unido, una especie es muy durable si su vida útil en el campo es de más de 25 años; mientras que Jantan y Kwong (1985) señalaron que para las condiciones de Malasia lo es si su vida útil es de más de 10 años. Ambos valores para catalogar la durabilidad natural de la madera están basados en probetas de duramen en contacto directo con el suelo, sin embargo se observa una diferencia sensible entre los parámetros utilizados en ambas tablas.

Los resultados obtenidos por Honorato *et al.* (1999), indican que existe un porcentaje similar entre la durabilidad natural de la madera de duramen y la de albura de los encinos y, en virtud de que no existen datos o estudios semejantes sobre la clasificación de la durabilidad natural de los encinos, se propone la escala que se presenta en el Cuadro 3.

De acuerdo con esta escala, *Q. castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. durifolia* y *Q. laurina* se clasifican como moderadamente durables; mientras que *Q. crassifolia*, *Q. rugosa* y *Q. obtusata* como durables. Debe considerarse que esta clasificación es una guía, puesto que la durabilidad varía y presenta amplias diferencias entre

Cuadro 3. Clasificación de la durabilidad natural de encinos.

Clase de Durabilidad	Tiempo de vida de las probetas en contacto con el suelo
I. Muy durable	Más de 10 años
II. Durable	De 5 a 10 años
III. Moderadamente durable	De 2 a 4.9 años
IV. No durable	Menos de 2 años

especies y dentro de una misma especie, dependiendo también de las condiciones climáticas y del suelo. El uso de la madera en forma natural estará en función del tiempo de exposición y de su contacto con el suelo.

CONCLUSIONES

El tiempo de deterioro total causado por hongos xilófagos en área cementerio, determinado para cada especie por medio de un modelo matemático, permitió establecer la capacidad de resistencia total de degradación de las especies en el siguiente orden ascendente: *Q. durifolia*, *Q. castanea*, *Q. laurina*, *Q. coccolobifolia*, *Q. rugosa*, *Q. obtusata* y *Q. crassifolia*. De acuerdo con la tabla de clasificación de durabilidad natural propuesta para las especies de encinos, *Q. castanea*, *Q. coccolobifolia*, *Q. durifolia* y *Q. laurina* se consideran como moderadamente durables, mientras que *Q. crassifolia*, *Q. rugosa* y *Q. obtusata* como durables.

Las características estructurales anatómicas y la composición química de la madera de las diferentes especies influyen en su comportamiento de deterioro con el tiempo. El caso más notorio fue *Q. castanea* que presentó la mayor resistencia en las primeras etapas de degradación, pero disminuyó más que la de las otras especies en la etapa final.

El tiempo máximo de uso de la madera en forma natural en contacto con el suelo fue de 26 meses para *Q. coccolobifolia*, 27.3 meses para *Q. laurina*, 27.6 para *Q. durifolia*, 28 para *Q. rugosa*, 32 para *Q. obtusata*, 33 para *Q. castanea* y 35 meses para *Q. crassifolia*.

Dado que en la práctica no siempre es posible conocer la especie con la que se trabaja, se debe de considerar el uso de la madera en forma natural por un tiempo

máximo de 26 meses, período en el que alcanza una degradación moderada y aún sería posible aplicarle algún tratamiento de preservación.

Los resultados obtenidos son aplicables a condiciones climáticas similares al área de estudio; Sin embargo, pueden variar a partir de las características ambientales prevalecientes.

REFERENCIAS

- ASTM. 1992. Standard Method of Evaluating Wood Preservatives by Field Test with Stakes. ASTM D 1758. American Society for Testing and Materials, Volume 04.09. Wood, pp. 280-286.
- Bautista H., R. 1999. Análisis químico de la madera de cuatro especies del género *Quercus*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo, División de Ciencias Forestales, Chapingo, Méx. 109 p.
- Behr, E. A. 1973. Decay test methods. In: Nicholas, D. D. (Ed.), Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Vol. I. Degradation and protection of wood. Syracuse University Press. Syracuse, New York. pp. 217-246.
- De la Paz P. O., C. 1976. Características anatómicas de cinco encinos de México. Bol. Téc. No. 46. Inst. Nac. Invest. For. México. 43 p.
- De la Paz P. O., C. 1985. Características anatómicas de siete especies del género *Quercus*. Bol. Téc. No. 123. Inst. Nac. Invest. For. México. 72 p.
- De la Paz P. O., C. y M. de L. Aguilar. E. 1978. Diferencias morfológicas externas y anatómicas de la madera de los encinos blancos y rojos. Bol. Téc. No. 59. Inst. Nac. Invest. For. México. 19 p.
- De la Paz P. O., C. y R. Salinas Q. 1977. Prueba rápida de laboratorio indicadora de resistencia a la pudrición en dos especies de encinos. Ciencia Forestal 2 (6): 3-19.
- Gómez N., M. S., Echenique, M. y R. Salinas. 1969. Índices de laboratorio sobre resistencia de la madera a la pudrición en once especies forestales mexicanas, Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For. No. 31, México, 40 p.
- Eriksson, K.-E. L., R. A. Blanchette, and P. Ander. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer-Verlag Berlin Heidelberg Germany, 407 p.
- Findlay, W. P. K. 1985. The nature and durability of wood. In: Findlay, W. P. K. (Ed.). Preservation of timber in the tropics. Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht. The Netherlands. pp. 1-13.
- Hart, J. H. and W. E. Hillis. 1972. Inhibition of wood-rotting fungi by ellagitannins in the heartwood of *Quercus alba*. Phytopathology 62 (6): 620-626.
- Herrera R., J. A., M. S. Gómez N. y A. Herrera B. 1976. Durabilidad natural de la

- madera de especies forestales mexicanas. I. Índices de durabilidad natural de quince especies forestales. Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For. No. 52. México. 18 p.
- Herrera R., J. A., M. S. Gómez N. y E. Barretero G. 1980. Durabilidad natural de la madera de catorce especies forestales mexicanas. Bol. Téc. Inst. Nac. Invest. For. No. 67. México, 21 p.
- Honorato S., J. A. y J. Hernández P. 1998. Determinación de componentes químicos de la madera de cinco especies de encino del estado de Puebla. Madera y Bosques 4 (2): 79-83.
- Honorato S., J. A., L. Vázquez S. y F. J. Zamudio S. 2001. Durabilidad natural de la madera de cinco especies de *Quercus* del Estado de Puebla. Polibotánica 12:85-102.
- Jantan, M. D. and T. M. Kwong. 1985. Natural durability of some Malaysian timbers by stake tests. The Malaysian Forester 48 (2): 154-159.
- Kirk, T. K. and E. B. Cowling. 1984. Biological decomposition of solid wood. In: Rowell, R. M. (Ed.). The chemistry of solid wood. American Chemical Society, Washington, D. C. pp. 455-487.
- Martínez, M. 1981. Los encinos de México. Anales del Instituto de Biología, UNAM, Comisión Forestal del Estado de Michoacán, Serie Técnica Manejo, No. 8. 2a. Edición, Michoacán, México. 358 p.
- Nilsson, T., G. Daniel, T. K. Kirk and J. R. Obst. 1989. Chemistry and microscopy of wooden decay by some higher Ascomycetes. Holzforschung 43 (1): 11-18
- Nixon, K. C. 1993. The genus *Quercus* in Mexico. In: Ramamoorthy, T. P., Bye, R., Lot, A. and J. Fa (Eds.). Biological diversity of Mexico: origins and distribution. Oxford. Oxford University Press. pp. 447-458.
- Salinas Q., R., R. Echenique, M. y L. Gálvez C. 1971. Observaciones acerca de la inducción de resistencia al ataque de hongos productores de pudriciones en madera tratadas con niveles variables de radiaciones gamma. Rev. Lat.-Amer. Microbiol. 13 : 45-58.
- Scheffer, T. C. and C. G. Duncan. 1949. Decay resistance of seven native oaks. Journal of Agricultural Research 59 (5/6): 129-152.
- Scheffer, T. C. and E. B. Cowling. 1966. Natural resistance of wood to microbial deterioration. Annual Review of Phytopathology 4: 147-170.
- Scheffer, T. C. 1973. Microbiological degradation and the causal organisms. In: Nicholas, D. D. (Ed.). Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Vol. I. Degradation and protection of wood. Syracuse University Press. Syracuse, New York. pp. 31-106.
- Torelli, N. and K. Cufar. 1994. Comparative decay resistance of 43 Mexican tropical hardwoods. Holz als Roh-und Werkstoff 52 : 394-396.
- Vázquez S., L. y J. A. Honorato S. 1999. Resistencia natural de la madera de cinco especies de encinos del estado de Puebla. Rev. Cien. For. en Méx. 25 (87): 45-57.

Wilcox, W. W. 1973. Degradation in relation to wood structure. *In*: Nicholas, D. D. (Ed.). Wood deterioration and its prevention by preservative treatments. Vol. I. Degradation and protection of wood. Syracuse University Press. Syracuse, New York. pp. 107-148.

VARIACIÓN GEOGRÁFICA EN LA RESPUESTA A LA SEQUÍA EN PLÁNTULAS DE *Pinus greggii* Engelm.

Carmelo Hernández Pérez¹, J. Jesús Vargas Hernández²,
Carlos Ramírez Herrera³ y Abel Muñoz Orozco⁴

RESUMEN

Se evaluaron plántulas de 15 poblaciones de *Pinus greggii* procedentes de dos regiones geográficas, bajo dos niveles de humedad del suelo en condiciones de invernadero, con el objeto de determinar el efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento en altura y en la acumulación y distribución de biomasa de las plantas. Se obtuvieron diferencias significativas entre regiones geográficas y poblaciones dentro de éstas en cuanto al crecimiento en altura. Los resultados indican que, en general, las del norte de México que tienen menor porte, fueron afectadas en menor grado por el estrés hídrico en su crecimiento y presentaron un mayor número de raíces y mayor peso seco de raíz que las del sur. Además, su crecimiento potencial (bajo condiciones favorables de humedad) se correlacionó en forma positiva con el impacto del déficit de humedad del suelo. Todas estas características hacen que las poblaciones del norte sean más tolerantes a la sequía. La respuesta de las plantas al estrés hídrico estuvo especialmente con la precipitación promedio anual. Las poblaciones de lugares muy relacionada con las condiciones climáticas del sitio de origen de la semilla, más secos con mayor latitud y altura sobre el nivel del mar, fueron más tolerantes a la sequía.

Palabras clave: Adaptación a la sequía, déficit hídrico, distribución de biomasa, *Pinus greggii*, tolerancia a sequía, variación geográfica.

Fecha de recepción: 15 de febrero de 2001.

Fecha de aceptación: 10 de febrero de 2004.

¹ SEMARNAT. Dirección de Plantaciones Forestales Comerciales. Av. Progreso No. 5, Viveros de Coyoacán, 04110 México, D. F.

² Colegio de Postgraduados, Programa Forestal, Montecillo, México.

³ Colegio de Postgraduados, Programa Forestal.

⁴ Colegio de Postgraduados, Programa de Genética.

ABSTRACT

Seedlings from 15 seed sources of *Pinus greggii* from two geographical regions were evaluated under two watering regimes in a greenhouse. The objective was to determine possible differences among populations in height growth and biomass allocation of seedlings in response to water stress. Significant differences between geographic regions and between populations within regions were found in seedling growth. Results show that populations from northern Mexico that are even smaller, were less affected by drought; they developed more growing roots and root biomass than southern populations. In addition, potential growth rate of populations (under favorable water conditions) was positively correlated with drought effect. All these traits conferred higher drought tolerance to northern populations. The response of seedlings from different seed sources to soil-water deficit was closely related to the environmental conditions at the site of origin, particularly to mean annual rainfall. Therefore, seed sources from drier sites with higher latitude and sea level, were more drought tolerant than those from wetter sites.

Key words: Drought adaptation, water deficit, biomass allocation, *Pinus greggii*, drought tolerance, geographic variation.

INTRODUCCIÓN

El agua es el factor ambiental de mayor importancia en el crecimiento y desarrollo de las especies forestales (Kozłowski *et al.*, 1991); la disponibilidad de humedad las afecta durante todo su ciclo de vida (Hinckley *et al.*, 1979). Sin embargo, el periodo más crítico se presenta en las etapas iniciales, principalmente en la germinación y establecimiento de las plántulas (Cleary, 1970). Los efectos del déficit de humedad del suelo en el crecimiento y metabolismo de las plantas han sido revisados por varios autores (Levitt, 1980; Jones, 1980; Hsiao y Bradford, 1983; Schulze, 1986). En esos estudios se ha determinado que la sequía incide en el desarrollo, la producción de materia seca total, el número de ramas laterales, la producción y tasa de crecimiento de las hojas y brotes, así como en el número de raíces en crecimiento, y la distribución de materia seca a la raíz y a la parte aérea. En consecuencia, la falta de agua ocasiona alteraciones importantes en las características anatómicas, morfológicas y del crecimiento de las plantas.

El estrés hídrico modifica la morfología y desarrollo de la raíz, lo cual impacta el crecimiento y supervivencia de las plantas (Meyer *et al.*, 1990; Cregg, 1994), pues se considera que un sistema radical amplio y ramificado es la principal característica de tolerancia a la sequía en especies forestales (Florence, 1985). Por ejemplo, en *Pinus taeda* L. las poblaciones procedentes de lugares más secos tienen una mayor tolerancia a escasez de agua, debido a su sistema

radical profundo y extenso (Teskey *et al.*, 1987; Seiler y Johnson, 1988). Existen resultados similares en *Pinus ponderosa* Laws. (McMillin y Wagner, 1995) y *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (White, 1987; Hasse y Rose, 1993).

En cuanto al crecimiento y producción de materia seca, el estrés hídrico afecta el crecimiento del tallo y de la raíz. No obstante, bajo sequía el desarrollo del brote es menor que el de la raíz, por lo que la relación parte aérea/raíz, estimada con base en el peso seco de ambas partes, se reduce y lo cual se interpreta como un mecanismo de adaptación. Estudios realizados en *P. ponderosa* y *P. taeda* muestran que el crecimiento y supervivencia al momento del trasplante tienen una correlación elevada con la longitud de la raíz y la relación parte aérea/raíz (Canell *et al.*, 1978; Bridgwater, 1990; Cregg, 1994).

A pesar de los efectos generales de la sequía sobre las plantas, es común que exista una gran variación inter e intraespecífica en la respuesta a este factor ambiental. Las poblaciones de sitios más húmedos cuando se desarrollan bajo condiciones de déficit hídrico, comúnmente manifiestan una menor germinación y supervivencia, así como menos producción de materia seca en la raíz y plantas de mayor altura. Abrams *et al.* (1990), al estudiar la respuesta a la falta de humedad de cinco genotipos de *Fraxinus pensylvanica* Marsh. distribuidos de este a oeste, desde el estado de Nueva York (sitios más húmedos) hasta el sur de Dakota (sitios más áridos), demostraron que el ecotipo de este último lugar mantiene una alta tasa fotosintética, una mayor conductancia y una baja altura en comparación con las plantas de Nueva York.

De igual manera, se mencionó que las poblaciones de *P. menziesii* con plantas pequeñas son más tolerantes a la sequía al desarrollarse en condiciones de humedad restringida, lo que está correlacionado con el clima del sitio de origen de la semilla (White, 1987; Joly *et al.*, 1989). Se conocen resultados similares al evaluar diferentes fuentes de semilla bajo condiciones de estrés hídrico sobre *Pinus greggii* Engelm (Cuevas *et al.*, 1992) y en *Eucalyptus microtheca* F. Muell. (Li, 1998).

En relación a la producción de materia seca, Gibson *et al.* (1995) mostraron que cuando el agua es limitada, las plantas de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. de zonas áridas generan más materia seca en la raíz que las procedentes del trópico húmedo, como un mecanismo de adaptación al estrés hídrico.

P. greggii es una especie endémica de México de gran importancia económica y ecológica en su área de distribución natural. Forma bosques puros o mezclados y su madera se usa en la industria del aserrío. La especie se adapta con cierta facilidad a terrenos pobres y se considera como tolerante a la sequía (Eguiluz, 1978; Vargas *et al.*, 1986; Cuevas, 1989), por lo que se utiliza en la recuperación de suelos degradados, en donde logra crecimientos aceptables (Saldivar, 1982). Se presenta en forma discontinua a lo largo de la Sierra Madre Oriental, en un área aproximada de 2500 km de norte a sur entre sus poblaciones extremas.

Debido a la discontinuidad geográfica, existen dos regiones de distribución de la especie: la norte, en los estados de Coahuila y Nuevo León, y la sur, en los estados de Querétaro, Hidalgo, Puebla y Veracruz (Donahue y Lopez-Upton, 1999), con grandes diferencias entre ellas en lo referente a las condiciones climáticas y edáficas, en especial en cuanto a precipitación, temperatura y pH del suelo. En estudios anteriores se han identificado variaciones notorias en el desarrollo de las plantas, asociadas al origen geográfico de la semilla, entre las dos regiones (Nepamuceno, 1990; Cigarrero, 1994; López, 1998).

En general, las poblaciones del sur tienen mayor velocidad de crecimiento que las del norte, tanto en diámetro como en altura (Dvorak *et al.*, 1996; Kietzka *et al.*, 1996; López, 1998). Algunos trabajos refieren contrastes de más de 150% en la altura promedio a los 2 años de edad entre las poblaciones de dos regiones (Cigarrero, 1994; López, 1998).

Dada la amplia variación intraespecífica, que por lo común existe en las especies forestales, es importante conocer su nivel de variación en la respuesta al déficit hídrico, así como los mecanismos de resistencia a sequía, para tratar de seleccionar poblaciones o ecotipos que se ajusten mejor a sitios particulares de plantación. Con este propósito, en 1998 se realizó un estudio de procedencias de la especie de interés en dos condiciones de humedad del suelo; su objetivo específico fue determinar los efectos del estrés hídrico sobre algunas características de crecimiento de plantas de diferentes poblaciones en sus etapas iniciales. Al mismo tiempo, se evaluó el rango de variación en su respuesta al déficit de humedad del suelo, en particular entre las dos grandes regiones geográficas en donde se localiza esta especie de forma natural.

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del ensayo

El ensayo se estableció en las instalaciones del vivero experimental de la Especialidad Forestal del Instituto de Recursos Naturales en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados en el Estado de México. Se incluyeron 15 poblaciones de las dos regiones geográficas del área de distribución natural de *Pinus greggii*. Cada una estuvo representada por una muestra de germoplasma obtenida a partir de 10 individuos. El material fue recolectado en 1997, los datos más importantes de los sitios de recolecta se presentan en el Cuadro 1. La semilla se sembró el 29 de junio de 1998 en contenedores de plástico de 150 cm³ de capacidad, con un sustrato compuesto por "peat-moss", vermiculita y agrolita en una proporción 6:3:1 (en volumen), al que se le agregó fertilizante osmocote de liberación lenta (18-06-12) en una dosis de 4 Kg/m³ de sustrato.

Cuadro 1. Localización geográfica y características de los sitios de recolecta del germoplasma utilizado en el estudio.

Núm. Procedencia	Coordenadas		Altitud (msnm)	Precipitación promedio anual (mm)	
	Lat. (N)	Long. (W)			
Región Norte					
01	Pto. Los Conejos, Coah.- N.L.	25° 29'	100° 35'	2520	600
02	Santa Anita, Coah.	25° 27'	100° 34'	2550	400
03	Agua Fria Coah.-N.L.	25° 26'	100° 28'	2400	633
04	Los Lirios Coah.	25° 23'	100° 31'	2420	600
05	C. Pto. San Juan, Coah.	25° 22'	100° 33'	2650	500
06	El Penitente, Coah.	25° 22'	100° 54'	2405	600
07	Jame, Coah.	25° 21'	100° 36'	2552	500
08	Las Placetas, N.L.	24° 55'	100° 12'	2450	600
09	La Tapona, N.L.	24° 44'	100° 06'	2130	600
Región Sur					
10	El Madroño, Qro.	21° 17'	99° 10'	1840	1600
11	Laguna Seca, Hgo.	21° 04'	99° 10'	1720	1500
12	El Piñón, Hgo.	20° 56'	99° 12'	1800	1600
13	Molango, Hgo.	20° 45'	98° 43'	1400	1700
14	Cienegilla, Hgo.	20° 44'	99° 02'	1860	1400
15	Zacualpan, Ver.	20° 26'	98° 20'	1800	1700

Se aplicó un diseño experimental de bloques completos al azar, con arreglo factorial en parcelas subdivididas y cuatro repeticiones. En el factor A se consideraron los dos niveles de humedad del suelo, asignados a las parcelas grandes; el factor B corresponde a las dos regiones geográficas (parcelas medianas) y dentro de ellas en forma aleatoria las poblaciones de cada región (parcelas pequeñas). La unidad experimental fue de cinco plántulas, para un total de 20 por tratamiento de humedad del suelo en cada población.

En el tratamiento S_0 el sustrato se mantuvo cercano a capacidad de campo (CC) durante el experimento; el S_1 consistió en suspender el riego hasta mantener la humedad del sustrato entre 25 y 60% de contenido de humedad, es decir de 40 a 75% por abajo del punto de marchitamiento permanente (PMP). Los ensayos de humedad del suelo iniciaron el 1 de julio de 1999 cuando las plantas tenían 12 meses de edad y se mantuvieron hasta el 1 de diciembre de ese año. El contenido de humedad del sustrato se controló mediante el método gravimétrico, con el uso de una balanza de precisión. Antes de iniciar el experimento se determinó la curva de retención de agua del sustrato (Figura 1), para establecer el contenido de humedad a nivel de CC (-0.03 MPa) y de PMP (-1.5 MPa) en términos de potencial hídrico.

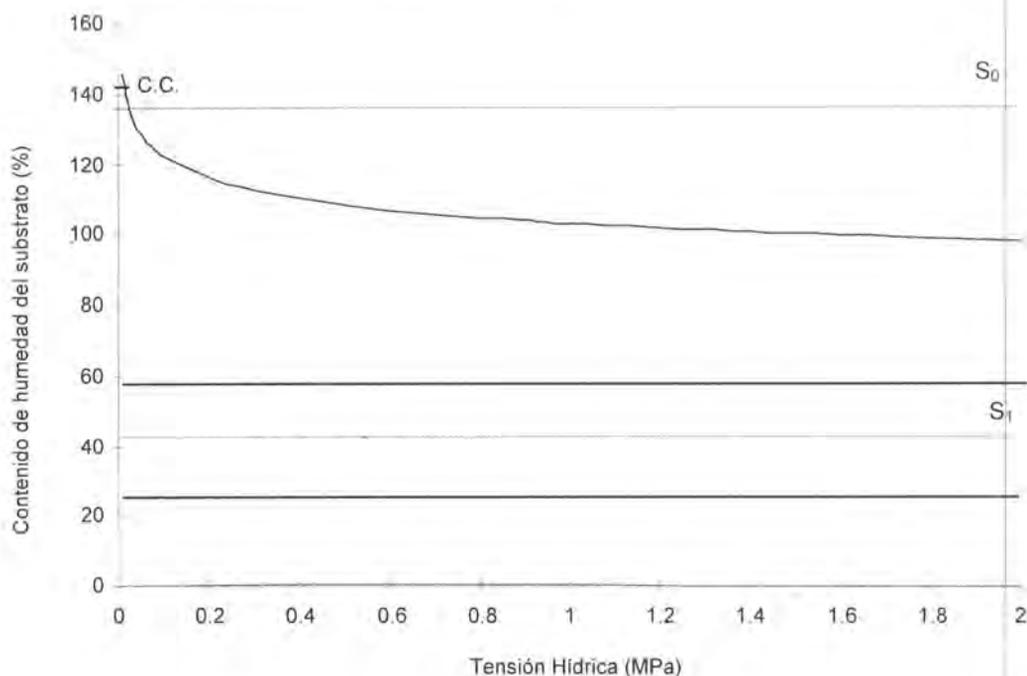


Figura 1. Curva de retención de humedad del sustrato y contenido de humedad en los tratamientos (S_0 , S_1) utilizados en el estudio.

Variables evaluadas y análisis estadístico

Para determinar el efecto del déficit hídrico en las plantas, se consideraron el crecimiento en altura y el diámetro; así como el número de raíces en crecimiento y el peso seco de raíz y parte aérea al final del experimento (el primero de diciembre de 1999), fecha en que se cosechó el material vegetal. La altura se midió desde la base del tallo hasta la yema terminal con una regla graduada en centímetros; el diámetro del tallo se midió con un vernier digital con aproximación a centésimas de milímetro. Las raíces en crecimiento fueron aquellas que presentaban puntas blancas al momento de extraer la plántula del envase. El peso seco de la raíz y de la parte aérea se determinó después de seccionar en dos partes los individuos con un bisturí; las muestras se colocaron en forma independiente en bolsas previamente etiquetadas y se secaron en una estufa durante 72 horas a una temperatura de 55 °C, con la finalidad de obtener el peso seco de la raíz y de la parte aérea en una balanza analítica. Con estos datos se calculó el peso seco total y la relación parte aérea/raíz de cada planta seleccionada.

Tanto el efecto del nivel de humedad, como las diferencias entre regiones geográficas y entre poblaciones dentro de regiones en la respuesta a la sequía se evaluaron con base en el análisis estadístico de los datos de crecimiento con el procedimiento GLM del paquete estadístico SAS, se utilizaron los datos promedio por parcela. En el análisis de varianza se usó el siguiente modelo:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + T_j + B_i * T_j + R_k + R_k * T_j + B_i * R_k * T_j + P(R)_{ik} + T_j * P(R)_{ik} + E_{ijkl}$$

Donde:

- Y_{ijkl} = valor de la variable en la i-ésima población de la k-ésima región geográfica en el j-ésimo tratamiento de humedad, del i-ésimo bloque;
- μ = media poblacional;
- B_i = efecto del i-ésimo bloque ($i=1, \dots, 4$);
- T_j = efecto del j-ésimo tratamiento de humedad del suelo ($j=1, 2$);
- $B_i * T_j$ = error de parcela grande;
- R_k = efecto de la k-ésima región;
- $R_k * T_j$ = efecto de la interacción de la k-ésima región geográfica con el j-ésimo tratamiento de humedad;
- $B_i * R_k * T_j$ = error de parcela mediana;
- $P(R)_{ik}$ = efecto de la l-ésima procedencia dentro de la k-ésima región geográfica;
- $T_j * P(R)_{ik}$ = efecto de la interacción del j-ésimo tratamiento de humedad con la l-ésima población dentro de la k-ésima región; y
- E_{ijkl} = error experimental.

En el modelo estadístico anterior los tratamientos de humedad y bloques se consideraron de efectos fijos, mientras que las regiones y poblaciones dentro de ellas, de efectos aleatorios.

Con el propósito de evaluar el grado de asociación entre la respuesta a la sequía y el potencial de crecimiento de las poblaciones se determinó el nivel de reducción relativa (D) de las características de crecimiento y producción de biomasa por efecto de ésta. Para ello se calcularon los valores promedio por población con base en la siguiente ecuación:

$$D = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100$$

Donde:

- S_0 = valor promedio de la característica en condiciones favorables de humedad (riego normal)
- S_1 = valor promedio de la característica bajo condiciones de humedad restringida.

La asociación entre D y el crecimiento promedio de cada población en condiciones favorables de humedad (S_0), se determinó por medio del coeficiente de correlación de Pearson. La correlación entre estas características se estimó en forma global para las poblaciones (i.e., $n=15$) y por separado para cada región geográfica (i.e., $n_1=9$ y $n_2=6$). El grado de asociación entre el crecimiento de las plantas en condiciones de estrés hídrico y las variables ambientales de los sitios de recolecta, se obtuvo de la correlación entre las variables medidas en las plantas y los datos geográficos y ambientales de los sitios (Cuadro 1), con los valores promedio por población.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la sequía sobre el crecimiento de las plantas

Los resultados del análisis de varianza mostraron un efecto altamente significativo ($p \leq 0.01$) de los tratamientos de humedad en todas las características evaluadas. También se observó una variación significativa, entre regiones geográficas y entre poblaciones dentro de las regiones y en la interacción de los tratamientos de humedad y regiones geográficas, pero no en la de los tratamientos de humedad por poblaciones para todas las características (Cuadro 2). Lo anterior indica que los efectos de la sequía se manifestaron, sobre todo, a nivel de región geográfica y que a pesar de existir diferencias entre poblaciones en las regiones, estas respondieron de manera similar a los tratamientos de humedad dentro de cada región.

Cuadro 2. Significancia estadística de las características de las plantas evaluadas en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. bajo dos condiciones de humedad en invernadero.

Variable	Media	Trat.	Reg.	R*T	P(R)	T*P(R)
Diámetro (mm)	4.69	**	ns	ns	**	ns
Altura (cm)	25.87	**	**	**	**	ns
Raíces en crecimiento (No.)	17.05	**	**	**	*	ns
Peso seco de la raíz (g)	1.71	**	**	*	**	ns
Peso seco parte aérea (g)	3.84	**	**	**	**	ns
Relación raíz/parte aérea	0.47	*	**	*	**	ns
Peso seco total (g)	5.56	**	ns	**	**	ns

**Diferencias significativas ($p = 0.01$); *Diferencias significativas ($p = 0.05$); ns = no significativo.

La reducción de la humedad ocasionó una disminución en todas las variables; sin embargo, el efecto fue mayor en el número de raíces en crecimiento y el peso seco de raíz. En promedio, bajo condiciones de sequía, éstas se redujeron en 47.3 y 28.4%, respectivamente, seguidas por el peso seco total de la planta, que fue afectado en 25.1%. El diámetro y altura solo disminuyeron entre 11 y 14%, en relación a las condiciones favorables de humedad (Cuadro 3).

En diferentes estudios se han citado resultados análogos; por ejemplo, Tan *et al.* (1995) mencionaron que *Picea mariana* (Mill.) B.S.P. redujo la acumulación total de biomasa en 23% por efecto de la sequía. Plantas de *Eucalyptus globulus* Labill. registraron 65% menos de biomasa total en condiciones de estrés hídrico; pero su crecimiento en altura fue impactado en menos del 20% (Osorio *et al.*, 1998). Se han observado respuestas parecidas en *Pinus ponderosa* P. & C. Lawson (McMillin y Wagner, 1995), *Pseudotsuga menziesii* (Joly *et al.*, 1989) y en *Pinus greggii* (Cuevas *et al.*, 1992).

Los efectos del déficit de humedad sobre la acumulación de biomasa fueron mayores en la raíz, lo que dio lugar a una reducción ligera (menos del 10%) en la relación raíz/parte aérea (Cuadro 3). Estos resultados difieren de los datos publicados para otras especies de coníferas, que generalmente consignan un impacto mayor en la parte aérea que en la raíz (Venator, 1976; Canell *et al.*, 1978; Seiler y Johnson, 1985; 1988; Cregg, 1994). No obstante, es probable que en el presente estudio, el crecimiento de la raíz se haya afectado más que el de la parte aérea debido al reducido espacio de crecimiento en los envases. Seiler

y Johnson (1988) obtuvieron en *Pinus taeda* L., una respuesta equivalente, asociada con un espacio limitado para el crecimiento de la raíz.

Cuadro 3. Valores promedio de las características de crecimiento al final de los tratamientos de humedad en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm.

Variables	Tratamiento S ₀	Tratamiento S ₁	D*(%)
Diámetro (mm)	4.99	4.41	11.60
Altura (cm)	28.91	24.91	13.84
Raíces en crecimiento (No.)	21.31	11.24	47.26
Peso seco de raíz (g)	1.94	1.39	28.35
Peso seco parte aérea (g)	4.43	3.38	23.70
Peso seco total (g)	6.37	4.77	25.12
Relación raíz/parte aérea	0.47	0.43	8.52

*Reducción del crecimiento por efecto de la sequía.

La relación raíz/parte aérea no es la única característica asociada con la tolerancia a la sequía. En un estudio con *Pinus discolor* Bayley et Hawksworth y *Pinus chihuahuana* Engelm. realizado por Barton y Teeri (1993) se advirtió que eran más tolerantes a la sequía, a pesar de tener un sistema radical de menor tamaño, que *Pinus engelmannii* Carr, *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* Engelm. y *Pinus strobiformis* Engelm., por lo que los autores concluyeron que las especies como *P. discolor* y *P. chihuahuana* toleran la sequía por mecanismos que evitan la pérdida de agua como son: una menor área foliar o mayor sensibilidad estomatal, y no por un incremento en la absorción de agua.

Variación geográfica en el crecimiento de las plantas

Referente a las diferencias entre regiones geográficas y poblaciones dentro de regiones, la mayor variación en casi todas las características de crecimiento se debió a las regiones geográficas; ya que contribuyeron con 38% o más de la variación fenotípica total (Cuadro 4). Las únicas excepciones fueron el diámetro y el peso seco total de la planta; en éstas las poblaciones dentro de regiones aportaron

un porcentaje alto de variación (40% en promedio) y las regiones geográficas no contribuyeron a la variación fenotípica de dichas características.

Cuadro 4. Componentes de varianza (%) de las características de crecimiento en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. bajo dos condiciones de humedad.

Variable	Componentes de varianza						
	σ^2_R	$\sigma^2_{R \cdot T}$	$\sigma^2_{B \cdot R \cdot T}$	$\sigma^2_{P(R)}$	$\sigma^2_{T \cdot P(R)}$	σ^2_W	σ^2_{Total}
Diámetro (mm)	0.00	0.00	3.48	33.62	0.00	62.9	0.07225
Altura (cm)	81.20	2.67	0.21	11.23	0.35	4.34	75.0359
Raíces en crecimiento (No.)	42.05	6.55	4.89	9.20	3.94	33.37	72.7547
Peso seco de raíz (g)	72.66	1.16	2.74	8.33	0.00	15.11	0.21274
Peso seco parte aérea (g)	37.94	15.08	1.05	26.16	0.00	19.75	0.46387
Relación raíz/parte aérea	75.37	2.19	5.19	6.49	0.00	10.76	0.03341
Peso seco total	0.00	7.29	2.41	45.08	0.00	45.22	0.31792

σ^2_R = Varianza de regiones, $\sigma^2_{R \cdot T}$ = Varianza de la interacción regiones por tratamientos, $\sigma^2_{B \cdot R \cdot T}$ = Varianza de la interacción bloques por regiones por tratamientos, $\sigma^2_{P(R)}$ = Varianza de procedencia dentro de poblaciones, $\sigma^2_{T \cdot P(R)}$ = Varianza de la interacción tratamientos por procedencias dentro de regiones, σ^2_W = Varianza del error, σ^2_{Total} = Varianza total.

Estos resultados indican que existe una clara diferenciación entre las poblaciones de ambas regiones en la mayoría de las características evaluadas. En el caso del crecimiento en altura, las regiones aportan 81.20% de la variación total y las poblaciones dentro de regiones sólo 11.23%, lo que evidencia la separación en el comportamiento de las plantas a nivel de regiones. El peso seco de la raíz y la relación raíz/parte aérea fue semejante; las regiones acumulan en promedio más del 70% de la variación total y las poblaciones dentro de regiones menos del 10%. Lo anterior implica que existe una distinción importante entre las dos regiones geográficas en el patrón de crecimiento de las plantas, lo que representa ecotipos o variedades de la especie, como ha sido postulado por Nepamuceno (1990) y Donahue y López-Upton (1999).

A pesar de que la variación entre poblaciones dentro de regiones fue menor, también fue significativa ($p < 0.05$), por lo que es posible identificar poblaciones

con mayor tasa de crecimiento u otras propiedades deseadas dentro de cada una. Por ejemplo, la población de "Los Lirios" en el norte presentó un crecimiento en altura (32.5 cm) similar al promedio de las poblaciones de la región sur (35.3 cm), razón por la cual podría ser seleccionada para el establecimiento de plantaciones en dicha región.

La interacción regiones geográficas-tratamientos de humedad contribuyó con menos de 10% a la varianza total en la mayoría de las variables (Cuadro 4), pero esa aportación fue significativa estadísticamente (Cuadro 2), lo que indica que la respuesta a las condiciones de sequía varió entre regiones geográficas. A pesar de que el déficit de humedad ocasionó una reducción significativa en las características de crecimiento en las plantas de las dos regiones geográficas, la magnitud del efecto fue diferente para cada región. Esta situación es evidente en el peso seco de la parte aérea, en el que la interacción aportó 15% de la varianza total.

Por lo general, las poblaciones del sur estuvieron más afectadas por el estrés hídrico que las del norte. Aunque la reducción relativa en diámetro y número de raíces en crecimiento por efecto de la sequía es equivalente en las plantas de las dos regiones geográficas, para el crecimiento en altura y acumulación de biomasa la respuesta fue diferente (Cuadro 5). Las poblaciones del sur disminuyeron 15.6% en promedio su crecimiento en altura; mientras que las del norte sólo 11%. En términos absolutos, los contrastes entre las dos regiones son aún mayores.

En cuanto a la producción de materia seca, también es evidente la diferente respuesta a la sequía entre ambas regiones, en particular en lo referente al peso seco aéreo y total. Las poblaciones del sur redujeron en casi 27% la acumulación de materia seca en la parte aérea, en cambio para las del norte la disminución fue menor a 20% (Cuadro 5).

El peso seco total tuvo un comportamiento semejante; la acumulación de biomasa al final del periodo de evaluación en las poblaciones del sur fue menor en casi 28% y para las del norte de solo 22.5%. Es probable que el mayor efecto del estrés hídrico en las poblaciones del sur esté relacionado con una tasa de crecimiento más alta en estas poblaciones, ya que existe una fuerte correlación significativa entre el potencial de crecimiento y su reducción por este factor (Figura 2).

En las poblaciones del sur se observó que existe una correlación positiva muy elevada ($r = 0.92$) entre el potencial de crecimiento en altura y su nivel de reducción por efecto del estrés hídrico. En las del norte la correlación entre estas variables es mucho más débil, lo que indica la posibilidad de que utilicen otros mecanismos para tolerar la deshidratación.

La relación raíz/parte aérea de las poblaciones de la región norte resultó más

Cuadro 5. Valores promedio por tratamiento y región geográfica de las características de crecimiento al final del periodo de evaluación en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm.

Variable	Región Norte			Región Sur		
	S_0	S_1	$D^*(\%)$	S_0	S_1	$D^*(\%)$
Diámetro (mm)	4.98	4.35	12.65	5.0	4.47	10.60
Altura (cm)	22.53	20.04	11.05	35.28	29.77	15.62
Raíces en crecimiento (No.)	26.83	14.11	47.71	15.79	8.37	46.99
Peso seco de raíz (g)	2.26	1.64	27.44	1.62	1.14	29.63
Peso seco parte aérea (g)	3.95	3.17	19.75	4.90	3.58	26.94
Peso seco total (g)	6.21	4.81	22.55	6.52	4.72	27.61
Relación raíz/parte aérea (g)	0.59	0.53	10.17	0.34	0.32	5.88

*Reducción del crecimiento por efecto de la sequía

afectada en términos relativos (porcentaje) que la de las de la región sur; sin embargo, los valores absolutos de la relación raíz/parte aérea de las primeras fue más elevada (casi el doble) que en las segundas.

Al parecer las poblaciones de *Pinus greggii* de la región norte tienen un mayor equilibrio entre la raíz y la parte aérea de manera intrínseca, por lo que pueden tolerar mejor el estrés hídrico sin reducir de manera drástica el crecimiento en la parte aérea. En consecuencia, una tasa relativa alta de crecimiento de la parte aérea, en comparación con la de la raíz, ocasionó una disminución de la relación raíz/parte aérea en condiciones de sequía.

En diferentes estudios realizados con otras especies de coníferas se ha determinado que, en general, las poblaciones de lugares secos son más tolerantes a la sequía que aquellas procedentes de lugares húmedos. López y Muñoz (1991) demostraron que las familias resistentes a la sequía de *P. greggii* registraron una menor altura como un mecanismo de evasión a la falta de agua. De igual manera, en *Pseudotsuga mensieszii* las poblaciones con plantas pequeñas son más susceptibles a desarrollarse bajo condiciones de humedad restringida, lo cual está relacionado con las condiciones climáticas del sitio de origen de la semilla (White, 1987; Joly *et al.*, 1989).

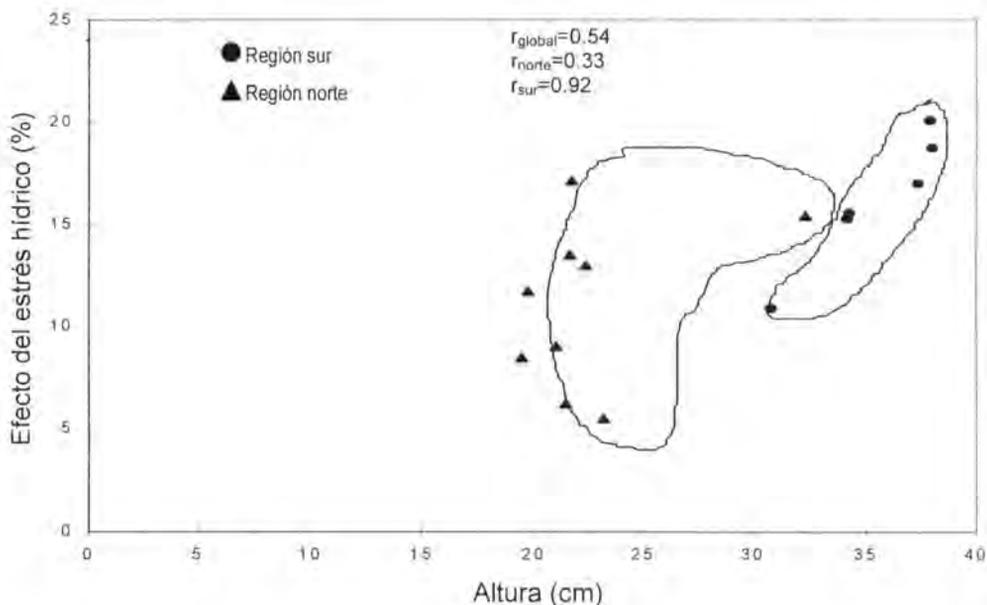


Figura 2. Correlación fenotípica del potencial de crecimiento en altura con el nivel de disminución del crecimiento por efecto de la sequía en un ensayo de procedencias de *Pinus greggii* Engelm. de dos regiones geográficas.

Al evaluar el efecto del estrés hídrico a nivel de especies se detectó un patrón similar de respuesta. *Larix occidentalis* Nutt. disminuyó en mayor grado su crecimiento en altura cuando se sometió a situaciones de escasez de agua, en comparación con *Pseudotsuga menziesii* y *Pinus ponderosa* (Zhang *et al.*, 1996), por lo que se concluyó que estas especies son más tolerantes a la sequía. Barton y Teeri (1993) cita el mismo comportamiento al comparar la respuesta a la sequía de *Pinus chihuahuana*, *Pinus discolor*, *Pinus engelmannii*, *Pinus ponderosa* var. *scapulorum* y *Pinus strobiformis*.

Dado que los patrones de respuesta a nivel inter e intraespecífico son parecidos, se infiere que las poblaciones del norte en este estudio son más tolerantes a la falta de agua que las poblaciones de la región sur, ya que mostraron una menor reducción relativa en su crecimiento.

Además, las poblaciones del norte tienen más producción de raíces en crecimiento, aún en condiciones de deshidratación que las del sur; así mismo, fueron menos impactadas por el estrés hídrico en otras características del crecimiento, por lo

que se puede concluir que la producción de raíces está relacionada con la mayor capacidad de tolerancia a la sequía de estas poblaciones. Es obvio que éste no es el único mecanismo existente para tolerar el déficit de humedad del suelo y es probable que otros estén actuando de manera simultánea.

En *Pinus taeda* se ha observado que los genotipos tolerantes a sequía tienen un sistema radical profundo, un número elevado de raíces laterales y una relación raíz/parte aérea alta (Canell *et al.*, 1978; Larsen *et al.*, 1986). No obstante, algunos autores mencionan que el número de raíces en crecimiento es quizás el factor que más ayuda a las plantas de algunas especies a tolerar la deficiencia de humedad del suelo (Brissette y Chambers, 1992; Mc Millin y Wagner, 1995).

Aunque la interacción tratamientos por poblaciones no fue significativa, en términos relativos se presentaron diferencias importantes entre ellas, por lo que es posible identificar poblaciones con tasa de crecimiento aceptable y otras características deseadas dentro de cada región geográfica, como es el caso de las plantas de "Los Lirios" en la región norte.

Patrón geográfico del desempeño de las plantas en condiciones de sequía

La mayoría de las características de crecimiento de las plantas en condiciones de sequía mostraron un patrón geográfico bien definido al correlacionarse con las coordenadas geográficas y las variables ambientales del sitio de origen del germoplasma.

Se obtuvo una correlación negativa alta ($r < -0.50$) entre la altura de la planta y el peso seco de la parte aérea con la latitud, la longitud y la elevación del sitio de origen (Cuadro 6). Es decir que las poblaciones a mayor altitud sobre el nivel del mar, de más al norte y oeste producen plantas con menor altura y tasa de acumulación de materia seca en la parte aérea. Dichas características también están relacionadas con la precipitación promedio anual, ya que existe una correlación positiva elevada ($r > 0.50$) con esta variable ambiental, de tal manera que, las poblaciones de sitios más lluviosos tienden a producir plantas con mayor tasa de crecimiento en altura y acumulación de materia seca en la parte aérea. Estos datos hacen evidente la relación que mantienen estas características con las condiciones ambientales del sitio de procedencia de la semilla.

Por otra parte, el peso seco de la raíz y el número de raíces en crecimiento bajo condiciones de sequía se correlacionaron en forma positiva ($r > 0.50$) con la latitud, la longitud y la elevación del sitio de origen, pero en forma negativa ($r < -0.50$) con la precipitación promedio anual. Las poblaciones de más al norte y con menor precipitación acumularon más materia seca en la raíz y presentaron más raíces en crecimiento bajo condiciones de sequía.

Cuadro 6. Correlaciones fenotípicas entre las características de crecimiento de las poblaciones (n=15) en condiciones de estrés hídrico y las condiciones ambientales de los sitios de origen.

Características del sitio	Características de las plantas				
	Diámetro	Altura	Peso seco		Raíces en Crecimiento
			Raíz	Parte aérea	
Latitud	-0.30	-0.89**	0.88**	-0.59*	0.68**
Longitud	-0.28	-0.85**	0.90**	-0.49*	0.69**
Elevación	-0.16	-0.82**	0.91**	-0.45	0.60*
Precipitación	0.30	0.80**	-0.80**	0.52*	-0.53*

**Correlación significativa con $p < 0.01$. *Correlación significativa con $p < 0.05$.

CONCLUSIONES

La sequía tuvo un efecto importante en todas las características de crecimiento evaluadas en las plantas de *Pinus greggii*, aunque su magnitud varió entre ellas. Las más afectadas fueron el número de raíces en crecimiento y el peso seco de la raíz.

Se identificaron diferencias claras entre las poblaciones de la región norte y las de la región sur en la respuesta a la sequía para la mayoría de las características evaluadas, especialmente, el crecimiento en altura, el número de raíces en crecimiento y la acumulación de materia seca en la raíz.

El impacto de la sequía estuvo relacionado con el potencial de crecimiento de las plantas, ya que las poblaciones con mayor potencial de crecimiento en altura fueron las más afectadas por el estrés hídrico.

Las poblaciones de *P. greggii* de la región norte, que tienen menor porte, fueron más tolerantes a la sequía. Estas plantas también presentaron mayor número de raíces en crecimiento y mayor peso seco de raíz en condiciones de escasez de agua que las de la región sur.

Al parecer existe un patrón geográfico y ambiental bien definido en el desempeño de las plantas de *P. greggii* bajo condiciones de sequía.

En general, las poblaciones de *P. greggii* de lugares más secos, mayor latitud y altura sobre el nivel del mar resultaron más tolerantes a la sequía.

REFERENCIAS

- Abrams, M. D., M. E. Kubiske and K. C. Steiner. 1990. Drought adaptation and responses in five genotypes of *Fraxinus pennsylvanica* Marsh: Photosynthesis, water relations and leaf morphology. *Tree Physiol.* 6:305-315.
- Barton, A. M. and J. A. Teeri. 1993. The ecology of elevational positions in plants: drought resistance in five mountain pine species in Southeastern Arizona. *Amer. J. Bot.* 80:15-25.
- Bridgwater, F. E. 1990. Shoot elongation patterns of loblolly pine families selected for contrasting growth potential. *For. Sci.* 36: 641- 656.
- Brissette, J. C. and J. L. Chambers. 1992. Leaf water status and root system water flux of shortleaf pine (*Pinus echinata* Mill.) seedlings in relation to new root growth after transplanting. *Tree Physiol.* 11:289-303.
- Cannell, M. G. R., F. E. Bridgwater and M. S. Greenwood. 1978. Seedlings growth rates, water stress responses and root-shoot relationship related to eight-year volumes among families of *Pinus taeda* L. *Silvae Genet.* 27:237-248.
- Cigarrero C., C. 1994. Evaluación temprana de seis procedencias y 108 familias de *Pinus greggii* Engelm. en dos localidades del estado de México. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de Méx. 65 p.
- Cleary, B. D. 1970. The effect of plant moisture stress on the physiology and establishment of planted Douglas-fir and ponderosa pine seedlings. Ph. D. Dissertation, School of Forestry, Oregon State University. Corvallis. OR, USA. 81 p.
- 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 Physiol.* 14: 883 - 898.
- Cuevas R., R. 1989. Drought tolerance study of four Mexican pine species. M.Sc. Thesis. Oregon State University. Corvallis, Oregon, U.S.A. 89 p.
- Cuevas R., R. A., P. de la Garza L. y F. Nepomuceno M. 1992. Estudio comparativo de la tolerancia a la sequía en procedencias de *Pinus greggii* Engelm. In: Memorias de la Reunión Científica Forestal y Agropecuaria. Centro de Investigación de la Región Centro, Campo Experimental Coyoacán. INIFAP SARH. 7-8 de diciembre de 1992. pp: 225-236.
- Donahue, J. K. and J. Lopez-Upton. 1999. A new variety of *Pinus greggii* (Pinaceae) in México. *SIDA* 18(4):1083 - 1093.
- Dvorak, W. S., J. E. Kietzka and J. K. Donahue. 1996. Three-year survival and growth of provenances of *Pinus greggii* in the tropics and subtropics. *For. Ecol. Manag.* 83:123-131.
- Eguiluz P., T. 1978. Ensayo de integración de los conocimientos del género *Pinus* en México. Tesis profesional, Departamento de Bosques, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de Méx. 613 p.
- Florence, R. G. 1985. *Eucalyptus* forests and woodlands In: Think trees, grow

- trees. Department of Arts, Heritage and Environment in association with the Institute of Forestry of Australia. Australia. pp: 29 - 50.
- Gibson, A., E. P. Bachelard and K. T. Hubick. 1995. Relationship between climate and provenance in *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. Aust. J. Plant Physiol. 22:453-460.
- Haase, L. D. and R. Rose. 1993. Soil moisture stress induces transplant shock in stored and unstored 2+0 Douglas- fir seedlings of varying root volumes. For. Sci. 39: 275 - 294.
- Hinckley, T. M., P. M. Dougherty, J. P. Lassoie, J. E. Roberts and R. O. Teskey. 1979. A severe drought; impact on tree growth, phenology, net photosynthetic rate and water relations. Journal Series No. 8247. University of Missouri. pp. 307-315.
- Hsiao, T. C. and K. J. Bradford. 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. In: Taylor, H. M., W. R. Jordan and T. R. Sinclair (Eds.). Limitation to efficient water use in crop production. ASACSSA-SSSA, Madison, WI. pp: 227 - 265.
- Joly, R. B., W. T. Adams and S. G. Stafford. 1989. Phenological and morphological responses of mesic and dry site sources of coastal Douglas-fir to water deficit. For. Sci. 35:987-1005.
- Jones, H.G. 1980. Interaction and integration of adaptive responses to water stress: the implications of an unpredictable environment. In: Turner, N. C. and P. J. Kramer (Eds.). Wiley Adaptations of plant to water and high temperature stress. Interscience. New York. pp: 353 - 365
- Kietzka, J. E., N. P. Denison and W. S. Dvorak. 1996. *Pinus greggii*, a promising new species for South Africa. For. Ecol. Manag. 75:225-230.
- Kozlowski, T. T., P. J. Kramer and S. G. Pallardy. 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press. USA. 657 p.
- Larsen, H. S., D. B. Shouth and J. M. Boyer. 1986. Root growth potential, seedling morphology and bud dormancy correlated with survival of loblolly pine seedlings planted in december in Alabama. Tree Physiol. 1:253 - 263.
- Levitt, J. 1980. Responses of plant to environmental stress. Academic Press Inc. New York. 697 p.
- Li, C. 1998. Variation of seedling traits of *Eucalyptus microtheca* origins in different watering regimes. Silvae Genet. 47:132-136.
- López A., J. L. 1998. Variación intraespecífica en el patrón de crecimiento en altura del brote terminal en *Pinus greggii* Engelm. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de Méx. 62 p.
- López U., J. y A. Muñoz Orozco. 1991. Selección familiar por tolerancia a sequía en *Pinus greggii* Engelm. I: Evaluación en plántula. Agrociencia 2: 111-123.
- Mc Millin, J. D. and M. R. Wagner. 1995. Effects of water stress on biomass partitioning of ponderosa pine seedlings during primary root growth and shoot growth periods. For. Sci. 41: 594-610.

- Meyer, W.S., C. S. Tan, H. D. Barrs and R. C. G. Smith. 1990. Root growth and water uptake by wheat during drying of undisturbed and repacked soil in drainage lysimeters. *Aust. J. Agric. Res.* 41: 253 - 265.
- Nepamuceno M., F. 1990. Diferenciación geográfica de plántulas de *Pinus greggii* Engl. *In: Memorias del XI Congreso Mexicano de Botánica. Soc. Bot. Mex. Oaxtepec, Mor. Méx.* 399 p.
- Osorio J., M., L. Osorio M., M. Chávez and J. S. Pereira. 1998. Water deficits are more important in delaying growth than in changing patterns or carbon allocation in *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiol.* 18:363-373.
- Saldivar C., J. D. 1982. Crecimiento y distribución de biomasa en plántulas de cinco especies forestales en Coatlínchán, México. Tesis Profesional. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Edo. de Méx. pp. 28.
- Schulze, E. D. 1986. Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37: 247-274.
- Seiler, J. R. and J. D. Johnson. 1985. Photosynthesis and transpiration of loblolly pine seedlings as influenced by moisture-stress conditioning. *For. Sci.* 31: 72-749.
- Seiler, J. R. and J. D. Johnson. 1988. Physiological and morphological responses of three half-sib families to water stress conditioning. *For. Sci.* 34: 487 - 495.
- Tan, W., T. J. Blake and T. J. B. Boyle. 1995. Early selection for drought tolerance and relationship to dry weight partitioning in black spruce families. *For.* 41: 168-180.
- Teskey, R. R., B.C. Bongarten, B. M. Cregg, P. M. Dougherty and T.C. Hennessey. 1987. Physiology and genetics of tree growth response to moisture and temperature stress: an examination of the characteristics of loblolly pine (*Pinus taeda* L). *Tree Physiol.* 3:41 - 61.
- Vargas H., J. J., A. Muñoz O., and M. R. Keyes. 1986. Drought response in seedlings of four *Pinus* species from Central México. *In: Ninth North American For. Biology Workshop Physiological and Genetic Basis of Forest Decline. June 15-18, 1986. Oklahoma State Univ. Stillwater, Oklahoma, USA.* pp 158-165.
- Venator, C. R. 1976. Natural selection for drought resistance in *Pinus caribaea* Morelet. *Turrialba* 26:381-387.
- White, T. L. 1987. Drought tolerance of southwestern Oregon Douglas-Fir. *For. Sci* 33: 283 - 293
- Zhang, J. W., J. D. Marshall and L. Fins. 1996. Correlated population differences in dry matter accumulation, allocation and water-use efficiency in three sympatric conifer species. *For Sci.* 42:242-249.

NOTA TÉCNICA

DESARROLLO AGROFORESTAL COMUNITARIO SUSTENTABLE EN LA REGIÓN FRONTERIZA MÉXICO – ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Concepción Luján Álvarez,¹ Constance L. Falk,² Christopher A. Erickson,³ John G. Mexal⁴ y Humberto Luján Álvarez⁵

RESUMEN

El deterioro ambiental y de los recursos naturales que se presenta en las zonas áridas y semiáridas de nuestro país y particularmente en la región fronteriza de México con Estados Unidos ha motivado un gran interés para buscar una transición hacia el desarrollo sustentable en este sistema ecológico. Al mismo tiempo, una situación común prevaleciente a lo largo del región fronteriza mexicana es que los sistemas de tratamiento de aguas residuales son inadecuados, muy caros y en algunos casos no existen, por lo que la necesidad para lograr un desarrollo sustentable en esta zona ecológica es muy necesaria. El presente estudio agroforestal en Ojinaga, Chih. (PACO), tuvo como uno de sus componentes fundamentales el uso y manejo de aguas residuales y de irrigación para la producción de madera para fibra para papel; integró criterios de desarrollo sustentable como lo es, entre otros, la participación de la comunidad fronteriza a través de conferencias de búsqueda y en el proceso de toma de decisiones para la planeación, aplicación y evaluación de las acciones definidas para su desarrollo futuro. Este incluyó aspectos ecológicos, sociales y económicos con el fin de reducir la presión sobre los recursos naturales, disminuir

Fecha de recepción: 15 de noviembre de 1999.

Fecha de aceptación: 19 de febrero de 2004.

¹ Universidad Autónoma de Chihuahua. Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales. Cd. Delicias, Chihuahua, Méx. clujan@uach.mx

² New Mexico State University, Department of Agricultural Economics and Agricultural Business, Las Cruces, New Mexico, U.S.A.

³ New Mexico State University, Department of Economics and International Business, Las Cruces, New Mexico, U.S.A.

⁴ New Mexico State University, Department of Agronomy and Horticulture, Las Cruces, New Mexico, U.S.A.

⁵ Secretaría de Educación Pública. Centro de Estudios Tecnológicos e Industriales # 98. Ojinaga, Chihuahua.

la contaminación ambiental, mejorar el uso, calidad y manejo de aguas residuales y de irrigación a fin de revertir las condiciones de los suelos salinos y abandonados existentes y generar mayores oportunidades económicas y fuentes de empleo para la gente de esta región fronteriza.

Palabras clave: Agroforestería, comunidad forestal sustentable, desarrollo sustentable, frontera México-E.U.A, Proyecto Ojinaga, uso de aguas residuales.

ABSTRACT

The environmental and natural resources deterioration in the arid and semiarid zones have motivated a great interest in order to look for a transition toward the sustainable development. This ecological condition includes areas in the border region between Mexico and the United States. A common prevalent situation along the border region is the inadequate wastewater treatment and in some cases, the absences of these systems. In addition, the conventional wastewater treatment systems are very expensive in order to be installed and operated, not providing the important advantages for the ecological and socio-economic growth. The Ojinaga Agroforestry Project (PACO) is an alternative that could direct those necessities, since it seeks to integrate approaches of sustainable development. A main component of this study is the use and management of wastewater and irrigation water for the commercial production of wood for fiber. In this sense, an important element is the involvement of the border community of Ojinaga, Chihuahua, Mexico, in the decision making process through the Search Conference Methodology. The social community participates in planning, implementing and assessing the actions for its development, including ecological, social and economic aspects. The purpose is to reduce the environmental pollution and the pressure on the natural resources. At the same time, these measures help to use and manage wastewater and irrigation water aiming to improve their quality and the salted soil conditions and abandoned lands, and generate better economic opportunities and sources of employment for the people in this border region.

Key words: Agroforestry, sustainable community forestry, sustainable development, México-U.S.A. border, Ojinaga project, wastewater use.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento del deterioro del medio ambiente ha motivado un interés acerca de la promoción del desarrollo económico sustentable. Este es especialmente relevante en áreas áridas y semiáridas frágiles que caracterizan gran parte de la frontera de México y los Estados Unidos. En virtud de la pobreza en la

región fronteriza, la protección del medio ambiente debe considerar realidades económicas para que sea exitosa.

Las instituciones del gobierno de México y Estados Unidos han adoptado políticas que enfatizan sobre el desarrollo sustentable. Una iniciativa importante es el Marco de Trabajo Frontera XXI entre la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). La misión específica del Marco de Trabajo Frontera XXI es alcanzar un medio ambiente limpio, proteger la salud pública y los recursos naturales, así como alentar el desarrollo sustentable. La meta principal del mismo es promover el desarrollo sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (USEPA, 1996).

La necesidad del desarrollo sustentable es muy reconocida, sin embargo, proyectos ambientalmente sanos y económicamente viables no son fáciles de identificar e implementar. El presente estudio agroforestal comercial de Ojinaga (PACO), pretendió encontrar el criterio de desarrollo sustentable basado en un proyecto comercial en dicha comunidad fronteriza. Este proyecto propuso organizar a los productores para manejar cooperativamente una plantación forestal para producción de madera de fibra corta.

Ojinaga se localiza en el Estado de Chihuahua, México y está situada en la confluencia del Río Bravo y el Río Conchos en la frontera de Estados Unidos y México, con una precipitación anual acumulada no mayor de 250 mm y temperaturas máximas registradas de 50°C y mínimas de 10°C.

La población de Ojinaga junto con su ciudad hermana, Presidio, Texas, es de aproximadamente 27,000 habitantes y demográficamente es una comunidad fronteriza típica y pequeña, en relación con el resto de las poblaciones de la frontera. El número de habitantes de Ojinaga ha bajado de 26,000 en 1980 a 23,600 en 1995 (USEPA, 1996). Esta es la única ciudad en la área fronteriza que muestra una población neta en decadencia en este período, en parte atribuida a la falta de oportunidades económicas en la comunidad, la cual se encuentra entre las más aisladas a lo largo de la frontera, lo que hace difícil atraer maquiladoras. Además, el programa de amnistía de los Estados Unidos en 1988 indujo a muchos ciudadanos de Ojinaga, quienes eran elegibles para la ciudadanía y trabajos a emigrar a ese país (Barrera, 1995).

El Distrito de Riego número 90 Bajo Río Conchos es administrado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y está dividido en cinco módulos en Ojinaga, con una extensión aproximada de 10,000 ha de tierra irrigable agrícola. La mitad del riego se recibe por medio de gravedad, mientras que el resto es suministrado por bombeo. Sólo de un 33 a un 50% de la tierra irrigable en el distrito de riego está en producción cada año. Los patrones de propiedad

de la tierra son altamente variables y fragmentados y aproximadamente la mitad está bajo el régimen de propiedad ejidal. La superficie restante es propiedad privada, incluyendo ranchos que varían en tamaño de menos de una hectárea a más de 100 ha. El promedio de propiedad privada son cinco hectáreas, la cual es muy pequeña para una producción agrícola competitiva (Núñez, 1997, comunicación personal¹).

El principal cultivo en Ojinaga es el algodón y adicionalmente otros cultivos incluyen alfalfa, maíz, trigo, melón, cebolla y nogal. La irrigación de estas tierras es procede del Río Conchos, pues de acuerdo con los tratados internacionales no puede tomar agua del Río Bravo. La ley mexicana permite la venta y transferencia de derechos de irrigación, pero un mercado funcional en derechos de agua no existe actualmente en Ojinaga.

Altos niveles de sal que ocurren en forma natural en el agua de irrigación y prácticas pobres de irrigación han dado como resultados suelos altamente salinos, creando condiciones no favorables para la producción agrícola. Por lo tanto, no hay perspectivas claras de crecimiento económico en este sector, lo que hace necesaria la búsqueda de ideas innovadoras para incrementar el crecimiento económico y la estabilidad.

El presente estudio tuvo como objetivo diseñar un plan de acción para el desarrollo futuro de la comunidad de Ojinaga, incluyendo aspectos ecológicos, sociales y económicos, ya que se pretende reducir la presión sobre los recursos naturales, disminuir la contaminación ambiental, mejorar el uso, calidad y manejo de aguas residuales y de irrigación; por este medio se busca revertir las condiciones de los suelos salinos y abandonados existentes, con el fin de generar mejores oportunidades económicas y fuentes de empleo para la gente de esta región fronteriza.

La Sierra Madre Occidental en el norte del país es un área que produce aproximadamente tres millones de metros cúbicos de madera que son cosechados cada año en los Estados de Chihuahua (33%) y Durango (67%), de los cuales el 90% es pino (*Pinus* sp.) y 10% es encino (*Quercus* sp.). Esta zona ha sido la fuente de abastecimiento de madera para la industria forestal de la región destinada a la producción de fibra para papel.

El sector forestal mexicano sufre problemas profundos y actualmente enfrenta retos significantes. La deforestación producto de la conversión del uso del suelo, tala ilegal, consumo de madera como combustible e incendios forestales continúa a un ritmo acelerado. La tasa aproximada de deforestación se estima en 0.6% por año en los bosques mexicanos templados (Zabin, 1995).

¹ INIFAP. Campo Experimental Ojinaga, estado de Chihuahua, México.

La Ley Mexicana actualmente requiere que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) apruebe un plan de manejo forestal previo al aprovechamiento forestal, sin embargo, su aplicación es problemática. La presión en la Sierra Tarahumara podría ser reducida por medio del desarrollo de proveedores alternos de madera, tales como las plantaciones para producir fibra a lo largo del Río Bravo.

La idea de establecer una plantación forestal para fibra de pulpa para papel en Ojinaga tiene un historial considerable en el pasado, pues esta área fue visualizada como un centro para producción comercial por la Compañía Papelera Mexicana (COPAMEX), la cual está ubicada en Anáhuac, Chih. y puede procesar 160,000 toneladas/año de esta materia prima. Sin embargo, actualmente procesa cerca de 140,000 toneladas/año, de las cuales la mitad es fibra corta, usualmente de encino (*Quercus* spp.) y la otra mitad es de madera larga, en su mayoría de pino.

Debido a la falta de fibra corta de bajo costo, COPAMEX buscó fuentes alternas y consideró a la región de Ojinaga como un lugar posible para la plantación de especies que la contengan, ya que dicha población puede vincularse con la planta industrial de Anáhuac, Chih. por vía de ferrocarril.

Esta empresa apoyó económicamente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) para realizar investigación en el Campo Experimental Ojinaga, con el fin de evaluar plantaciones de eucalipto (*Eucalyptus* sp.) para la producción de fibra y establecer parcelas piloto en terrenos que la compañía rentó. COPAMEX no siguió adelante con su programa de plantaciones forestales en Ojinaga, ya que los administradores de la compañía explicaron que esta decisión estuvo basada en la incertidumbre acerca del suministro de agua para riego, aunque residentes de Ojinaga han indicado que éste no ha sido restringido significativamente, ni siquiera durante el período de sequía extrema de 1995-1996.

Una de las áreas principales de interés binacional para el mejor manejo de recursos del área fronteriza es evitar la contaminación del agua mediante el establecimiento de infraestructura para el agua potable y colección y tratamiento de desechos (USEPA, 1996). A lo largo de la frontera mexicana, los métodos de tratamiento de desechos son inadecuados o totalmente inexistentes. Los sistemas convencionales son demasiado caros para su instalación y mantenimiento en México y no proporcionan ventajas económicas de desarrollo; sin embargo, el manejo y aplicación de lodo y aguas residuales para producir fibra corta para pulpa para papel puede reunir todas estas necesidades.

En noviembre de 1994, un equipo interdisciplinario de investigadores de la Universidad Estatal de Nuevo México (New México State University), se reunió

con representantes de varias instituciones y grupos en Ojinaga para determinar su interés en un tratamiento integrado de aguas negras y un proyecto de producción de biomasa. Las opiniones difirieron con respecto a qué tipo de proyecto debería realizarse; varios participantes enfatizaron la necesidad de incluir metas de la comunidad en el diseño del proyecto, como serían: un desarrollo socioeconómico, mejorar la calidad del agua y los aspectos ambientales.

En este proceso se puso énfasis en la participación de la comunidad para la definición de sus intereses, deseos y preferencias, y con este fin se organizó en mayo de 1995, una conferencia de búsqueda y un taller de diseño participativo (CBDP), éste es un proceso democrático basado en la comunidad, lo cual se considera como la clave para la sustentabilidad humana y de la naturaleza, así como el desarrollo de recursos (Diemer y Alvarez, 1995). Esta metodología sustenta que los proyectos fracasarán si se imponen en las comunidades o asumen el apoyo de la comunidad a dicho proyecto, pues la autodeterminación es crítica para la realización tecnológicamente apropiada (Cabana y Emory, 1995).

Los participantes del proceso CBPD identificaron necesidades claves, desafíos y posibles acciones para resolver el problema de las aguas residuales, considerando que cualquier tecnología propuesta debía de ser de capital y costos de operación bajos, ayudar a revitalizar la economía local, generar ingresos para reembolsar préstamos y fácil de mantener por la comunidad. El sistema también necesitaría mejorar la calidad de agua descargada al Río Bravo y reunir los estándares ambientales de ambos países.

La opción de tratar las aguas residuales de la ciudad por medio de plantaciones forestales usadas para producción de biomasa se recibió favorablemente por la comunidad, con un fuerte compromiso de la misma y sugirió incluso que el sistema debiera de utilizarse en tierras abandonadas para generar ingresos, que revitalizarían el clima de negocios de la comunidad (Barrera, 1995).

Subsecuentemente, se integró un equipo multidisciplinario técnico binacional y bilingüe y a finales de septiembre de 1996 se inició un estudio piloto para evaluar especies forestales e índices de aplicación de aguas residuales. Para determinar qué especies se evaluarían, se consideraron tres criterios importantes: tolerancia a la sequía, tolerancia a la sal y ciclo de corta corto; este último es particularmente importante dados los recursos financieros limitados disponibles por los agricultores de Ojinaga. Con base en lo anterior tres especies de árboles fueron identificados como posibles opciones: eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis* D. Don.), el cual fue propuesto por COPAMEX y es tolerante al frío (Núñez, 1994a, b, c); un híbrido de álamo (*Populus* sp.), ya que es nativo del Río Bravo y está presente en otros valles del río en áreas cálidas y secas; así como robinia (*Robinia pseudoacacia* L.), ya que se conoce por su vigor y se ha usado en la estabilización de zonas afectadas por los arroyos y en la recuperación de minas. Los resultados del proyecto piloto fueron satisfactorios, a partir de las características de las especies (Cuadro 1).

Cuadro 1. Criterios de selección para las especies de árboles.

Criterios	E s p e c i e s		
	<i>Populus</i> sp.	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Robinia pseudoacacia</i>
Usos	Pulpa, madera, artesanías	Sólo pulpa	Pulpa, madera, muebles, y artesanías
Texturas mejor del suelo	Pesado y medio	Pesado, medio, y ligero	Medio y ligero
Tolerancia a la sal	Medio (más que algodón, menos que eucalipto)	Alto	Alto a medio, pero no bien establecido
Necesidades de agua	No tolerancia a la sequía	Tolerancia de sequedad	Tolerancia a la sequía
Tolerancia a la heladas	Muy resistente	Poco resistente	Muy resistente

Los resultados preliminares indican que la primera corta se puede llevar a cabo después de siete años, la segunda y la tercera cosecha se harán a los siguientes seis años, respectivamente; una replantación se requerirá probablemente después de tres rotaciones.

Basado en los positivos resultados iniciales del INIFAP y los esfuerzos del proyecto piloto (el cual en la primavera de 1999 empezó su tercer año de colección de los datos), se generó el inicio de un proyecto el 7 de noviembre de 1998 para promover una industria de producción de fibra corta en Ojinaga en la que participaron especialistas del INIFAP, Distrito de Irrigación Bajo Río Conchos, Universidad Estatal de Nuevo México, Universidad Autónoma de Chihuahua y SEP-CETIS No. 98 y una amplia participación de la comunidad.

El equipo estableció que en una primera fase se debería analizar la viabilidad financiera del proyecto, de los productores y la perspectiva de la cooperativa así como identificar las áreas del distrito de riego en Ojinaga para incluirlas en el

proyecto, considerando la perspectiva de los productores y la cooperativa e identificar a las familias y sus tierras que pudieran estar involucradas. Asimismo, era importante identificar agencias e instituciones que proveyeran posibles fondos económicos e identificar el mercado potencial para la fibra corta de pulpa para papel en México y en otras partes y preparar las propuestas para presentarlas a dichas agencias; mientras que en la segunda fase se determinó que debía operar una organización de productores.

Los miembros del equipo de PACO escucharon las preocupaciones de los agricultores, muchos de los cuales fueron incorporados en los análisis financieros y el plan para la cooperativa. La culminación de las reuniones con los representantes designados de cada módulo de irrigación fue en mayo de 1999, en el cual decidieron formar un comité directivo para buscar fondos e identificar procedimientos legales que seguir.

Desde el inicio de este proceso se identificó la forma de la cooperativa como una organización del negocio y fue considerado el más apropiado para el proyecto, pues son negocios poseídos y operados por los miembros/usuarios para su propio beneficio. La Ley actual que las gobierna en México es la Ley General de Sociedades Cooperativas de 1994 y expresa que los principios fundamentales de estas formas de organización son el control democrático por miembros/dueños, manejo por los miembros/dueños y el retorno limitado sobre el capital del dueño inversionista.

Se identificaron seis ventajas de una cooperativa forestal comercial en este proceso: proporcionar una fuente de ingreso y empleo, usar y mejorar tierras agrícolas abandonadas y/o salinas, rescatar y mantener la infraestructura hidráulica para irrigación del distrito de riego deteriorado, diversificar la economía local, establecer una organización que pueda proporcionar servicios y apoyo a productores comerciales de fibra para papel, y crear un equipo capacitado que pueda aprovechar los árboles a partir de un sistema basado en la plantación y cosecha con el uso de aguas residuales.

La determinación de las responsabilidades de la cooperativa y de los productores fue importante para los análisis financieros. Así, el productor debería preparar la tierra (nivelación, etc.), comprar la planta forestal y plantarla, deshierbar y fertilizar, irrigar, podar en el tiempo de la cosecha, y vender a la cooperativa. Por su parte, la cooperativa debería organizar un calendario de plantaciones y cosechas, proporcionar ayuda técnica, cortar y preparar los árboles para la venta, transportarlos al mercado, negociar el precio en nombre de los miembros, firmar los contratos de venta, administrar los recursos de la cooperativa, y distribuir utilidades a los miembros de acuerdo a su participación.

Fue necesario hacer varias consideraciones con respecto a ingresos y costos en los análisis financieros (mayo 1999). Se asumieron cosechas a los 7, 13 y 19

años. La primera fue estimada en 110 toneladas métricas en seco, mientras que las subsiguientes disminuirán en 10%. El precio internacional de material seco se calculó en US\$62.00/m³, del cual US\$25.00/m³ se retendría por la cooperativa para cubrir los gastos y US\$37.00/m³ se destinaría al agricultor. Los costos de entrada fueron: la preparación de la tierra (US\$150.00/ha), árboles (US\$375.00/ha a US\$0.25/árbolito), fertilizante (US\$25.00/aplicación/ha) y control de malezas, particularmente en el primer año, cuando los árboles no han crecido lo suficiente para eliminar las malas hierbas; mientras que el costo de mano de obra por plantación, control de malezas y fertilización fue estimado en US\$1.00/hora, el sueldo local predominante.

Una tasa interna de retorno (TIR) ajustada en capital por inflación fue estimada a 17%. En promedio se calculó una ganancia anual en tres rotaciones (19 años) de US\$284.00/ha (el cálculo de TIR está disponible con los autores bajo requerimiento). Este retorno es consistente con otro estudio de plantación de fibra en el norte de México (Barden-Coholan *et al.*, 1998).

Los costos de transporte son un factor crucial para determinar la competitividad, afortunadamente, Ojinaga tiene acceso al transporte por ferrocarril a la planta de COPAMEX en Anáhuac, Chih., lo que hace a ésta el cliente más obvio para la fibra producida, aunque hay otras diez plantas productoras de pulpa en México y además el acceso por ferrocarril a Houston, Texas.

La viabilidad financiera y de mercado de un proyecto no son las consideraciones únicas en la decisión de adoptar un proyecto para la producción de fibra para papel (Current *et al.*, 1995). Los productores están interesados en considerar también el riesgo, la disponibilidad de tierra, mano de obra, agua, migración y el capital financiero.

a) Riesgo: Este factor es importante, especialmente para productores de bajo ingreso y empobrecidos. La producción agrícola actual en el distrito Bajo Río Bravo está concentrada en el algodón, que produce más de la mitad de los ingresos en el área (Núñez, 1997, comunicación personal²). Los precios del algodón son determinados en los mercados mundiales, dando a los productores un considerable riesgo para la fluctuaciones de los precios, por lo que un sistema de producción de fibra para papel incrementaría la diversificación de cultivos y reduciría el riesgo en el sector agrícola.

b) Tierra: En los terrenos que no tienen problemas de salinidad, el sistema de producción de fibra no es competitivo con relación a otros cultivos comerciales. En contraste, las especies de árboles probadas pueden ser muy bien adaptadas en terrenos con alta salinidad; por lo que en esta situación el sistema de

² INIFAP. Campo Experimental Ojinaga, estado de Chihuahua, México.

producción favorecería el mejoramiento de los suelos y calidad del agua. Aproximadamente de un 33 a un 50% de las tierras que cuentan con riego son abandonadas ya sea por problemas de salinización o por razones económicas. Una gran ventaja del sistema de producción es que puede ser utilizado en tierras improductivas.

c) Mano de obra: La mano de obra es un interés muy importante para los productores dado que el desempleo es alto en Ojinaga. Una ventaja de la producción de fibra es que las necesidades de mano de obra son más flexibles que en la agricultura tradicional. Irrigación, plantación y cosecha de árboles pueden ser programados para ajustarse con la etapa crítica de mano de obra en la agricultura local. Sin embargo, no todos los productores viven en sus parcelas y muchos de ellos son empleados fuera del campo.

d) Irrigación: El acceso a la irrigación es de gran interés para los campesinos de cualquier región en zonas áridas y semiáridas y los productores de Ojinaga no son la excepción. La región norte de México sufrió condiciones de sequía desde 1991 a 1996 y otra vez en 1999 (Valdez, comunicación personal³). El abastecimiento de agua fue irregular en el lado mexicano de la frontera durante esos periodos. Sin embargo, para los productores del Distrito Bajo Río Conchos, debido a su geografía, la sequía no ha sido un problema en el abastecimiento de agua para riego, sobre todo en los últimos 10 años.

En contraste, el mantenimiento de la infraestructura hidráulica del Distrito de Riego sí es un problema, debido a que a través del tiempo se ha estado deteriorando y su mantenimiento se ha reducido por la salinización y abandono de tierras. El sistema de producción de fibra representa una alternativa adicional para el uso de dichas tierras y favorecer a la reconstrucción de la infraestructura.

e) Migración: Considerando que una de las causas fundamentales en la baja de población en la región de Ojinaga es la emigración de su gente a los E.U.A., el proyecto PACO representa una opción más para la generación de empleos y así de esta manera, lograr el arraigo de la gente local en su tierra.

f) Capital financiero: El sistema de producción de fibra es una inversión a largo plazo, por lo que requiere de un financiamiento también a largo plazo, aunque los pequeños productores tienen acceso limitado a los mercados financieros.

En enero de 1992, el Artículo 27 Constitucional fue revisado para permitir la venta y renta de tierras ejidales y también puedan ser usadas en calidad de garantía por concepto de préstamos económicos recibidos por los ejidatarios. En la práctica, el bajo valor real de estos terrenos y la falta de desarrollo hace difícil que los bancos realicen préstamos económicos a los ejidatarios. Por lo tanto, una

³ Gerente de la Comisión Nacional del Agua. Distrito de Riego 090. Ojinaga, Chih.

de las mayores ventajas de una organización cooperativa en la implementación del proyecto PACO es que permite incrementar las posibilidades de acceso a fuentes de financiamiento a largo plazo. Adicionalmente, una de las funciones del equipo multidisciplinario técnico del proyecto fue ayudar al comité directivo local a investigar opciones financieras para su realización.

El estudio agroforestal comercial de Ojinaga (PACO) resultó un éxito porque se incluyó a sus residentes con un equipo técnico multidisciplinario. La participación de la comunidad a través de la Conferencia de Búsqueda demostró que es una metodología adecuada para la planeación estratégica participativa en la definición de los intereses de la comunidad para su desarrollo. Las reuniones abiertas frecuentes con productores, así como la disponibilidad de fondos económicos externos y la colaboración de un equipo multidisciplinario binacional y bilingüe, facilitó el estudio.

PACO puede ser una oportunidad para avanzar hacia un desarrollo sustentable de la comunidad de Ojinaga y favorecer su economía, las condiciones ambientales del lugar y la infraestructura hidráulica del Distrito de Riego.

REFERENCIAS

- Barden-Coholan, J. Case, A. Culp and R. Devine. 1998. *Sylvan Corporation: A Plan for Mexican Pulpwood Production*, Mimeo. 20 p.
- Barrera, L. P. 1995. Reporte del evento participativo llevado a cabo los días 22, 23 y 24 de mayo de 1995, en Ojinaga, Chihuahua, para diseñar el Proyecto "X". El Colegio de México: México, D. F. 42 p.
- Cabana, S., F. Emery and M. Emery. 1995. The search for effective strategic planning is over. *The Journal for Quality and Participation*. 18 (4): 10-19.
- Current, D., E. Lutz and S. Scherr. 1995. Cost, benefits, and farmer adoption of agroforestry: Project Experience in Central America and the Caribbean. *World Bank Environmental Paper*, Number 14.
- Diemer, J. A. and R. C. Alvarez. 1995. Sustainable community forestry: A participatory model. *Journal of Forestry*. 93 (10): 10-14.
- Núñez, R. S. 1994a. Informe anual del proyecto "Establecimiento y manejo de praderas y cultivos asociados bajo plantaciones de *Eucalyptus camaldulensis*". Campo Experimental Ojinaga, C.I.R. Norte Centro, INIFAP. Ojinaga, Chihuahua, México. Informe anual. 20 p.
- Núñez, R. 1994b. Evaluación geográfica de 11 especies de *Eucalyptus* y una Casuarina. Campo Experimental Ojinaga, C.I.R. Norte Centro, INIFAP. Ojinaga, Chihuahua, México. Informe anual. 10 p.
- Núñez, R. 1994c. Evaluación geográfica de 12 especies de rápido crecimiento. Campo Experimental Ojinaga, C.I.R. Norte Centro, INIFAP. Ojinaga, Chihuahua, México. Informe anual. 9 p.

