

Crecimiento de cuatro familias de *Pinus taeda* en respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en el establecimiento de la plantación

Laura I. Faustino^{1,3}, Nardia M.L. Bulfe,² Martín A. Pinazo², Corina Graciano¹

¹ Instituto de Fisiología Vegetal (INFIVE), CONICET - UNLP. Diag. 113 N° 495, CP 1900 - La Plata, Argentina; ² Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Av. El Libertador 2472, CP 3384, Montecarlo, Misiones, Argentina; ³ laurafaustino@agro.unlp.edu.ar

Faustino L I; N M L Bulfe; M A Pinazo; C Graciano (2012). Crecimiento de cuatro familias de *Pinus taeda* en respuesta a la fertilización con nitrógeno y fósforo en el establecimiento de la plantación. Rev. Fac. Agron. Vol 111 (2): 54-63.

Los individuos de *Pinus taeda* utilizados en plantaciones comerciales sobre suelos lateríticos de Argentina, presentan heterogeneidad en la respuesta a la fertilización con nitrógeno (N) y fósforo (P) durante el establecimiento. En general, las respuestas en crecimiento a la aplicación de P son positivas, mientras que la aplicación de N en forma de urea tiene un efecto perjudicial. El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta a la fertilización con N y P de cuatro familias de *P. taeda* seleccionadas de un plan de mejoramiento genético, y determinar si la mejora genética permite obtener materiales con diferente respuesta a la adición de estos nutrientes. Los resultados demuestran que existe variabilidad entre las familias en el crecimiento en altura y diámetro del cuello, 8 y 16 meses luego de realizada la fertilización. Las familias de mayor tasa de crecimiento, respondieron positivamente a fertilización con P y no fueron afectadas por la fertilización con N. La familia que tuvo un crecimiento intermedio, no respondió a la adición de P y fue negativamente afectada por el N. La familia de menor crecimiento, respondió positivamente frente a la fertilización con P, pero fue negativamente afectada por el N. La mejora genética permite obtener genotipos con altas tasas de crecimiento que respondan en mayor magnitud a la fertilización con P y que no sean negativamente afectados por la adición de nitrógeno. Mediante el mejoramiento genético se puede evitar la penalidad en crecimiento que implica fertilizar con urea en el establecimiento, factor que facilitaría la utilización de esta práctica silvícola para recuperar o mantener la dotación de N de los sitios que están sujetos a repetidos ciclos de plantación y cosecha.

Palabras claves: efecto depresivo, crecimiento inicial, urea, super fosfato triple, mejoramiento genético, interacción genotipo fertilización

Faustino L I; N M L Bulfe; M A Pinazo; C Graciano (2012). Growth of four *Pinus taeda* families in response to fertilization at establishment with nitrogen and phosphorus. Rev. Fac. Agron. Vol 111 (2): 54-63.

Commercial seedlings of *Pinus taeda* have heterogeneous responses to nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilization at planting on lateritic soils of Argentina. In general, P addition increases plant growth, while N fertilization with urea reduces it. The aim of this work was to evaluate the response of four *P. taeda* families to N and P fertilization at planting and to determinate if populations with different response to fertilization can be obtained by breeding programs. Results demonstrate that 8 and 16 months after planting there was variation between families in collar diameter and height in the response to fertilization. Families with high growing rate had positive responses to P addition and they were not affected by N fertilization. The family with intermediate growth was negatively affected by N and it did not respond to P fertilization. The family of lower growth rate responded positively to P addition but was negatively affect by N. Breeding programs are useful tools to obtain high growing rate families that respond positively to fertilization, or at least, that are not negatively affected by N fertilizers addition. It is possible to maximize the response to P fertilization and to solve the depressive effect of urea fertilization at planting through family selection. Therefore, it is possible to use initial N fertilization of selected families to recover or maintain the fertility of the sites subject to repeated planting and harvesting cycles.

Keywords: depressive effect, initial growth, urea, triple super phosphate, breeding plan, genotype fertilization interaction.

Recibido: 12/06/2012

Aceptado: 22/10/2012

Disponible on line: 20/11/2012

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN

Argentina posee en la actualidad más de un millón de hectáreas forestadas, de las cuales el 55% corresponden a plantaciones del género *Pinus* (Gauchat & Rodríguez, 2005). En las provincias de Corrientes y Misiones está la mayor superficie ocupada por bosque implantados en la actualidad, y suman entre ambas aproximadamente 500.000 ha forestadas con especies de éste género, dentro de las cuales *Pinus taeda* es la especie más difundida (Elizondo & Consejo Federal de Inversiones, 2009; SIFIP, 2010). Esta especie es la conífera que más se implanta en el mundo por su alta productividad en madera. La mayor superficie forestada está en Estados Unidos, de donde es originaria, seguido de Brasil, Argentina y Uruguay (FAO, 2006). Los crecimientos en las zonas subtropicales de Sudamérica superan en más del doble la productividad alcanzada por la especie en su lugar de origen, llegando a los 30-35 m³ ha⁻¹ año⁻¹ (Cubbage et al., 2007).

La fertilización es una práctica silvícola ampliamente difundida en el mundo, tendiente a mejorar la calidad y la productividad de los sitios (Allen, 1987). Además es una herramienta útil para mitigar la extracción de nutrientes que se realiza con las sucesivas cosechas y el posterior preparado del terreno, de manera que sea posible mantener la estabilidad nutritiva y la fertilidad del sitio y tender a la sustentabilidad del sistema forestal (Fox, 2000; Goya et al., 2003; Nambiar, 1997). Con la cosecha de pinos en Misiones, se extrae por ha 550 kg de nitrógeno (N), 20 kg de fósforo (P) y 230 kg de potasio (Goya et al., 2003). El N es el único nutriente que puede ingresar al sistema en cantidades significativas, principalmente mediante la fijación biológica, que puede ser libre o simbiótica, generalmente asociada a las leguminosas (Knops et al., 2002). La reposición de N por fijación biológica asociada a plantaciones de pino es baja (Barkmann & Schwintzer, 1998) comparada con la cantidad de este nutriente extraída en la cosecha; por ejemplo en plantaciones de *P. elliotii* del sudeste de Estados Unidos, la fijación no simbiótica anual de N es menor a 5 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Son, 2001). Dada la alta exportación de nutrientes, su reposición es imprescindible para mantener la sustentabilidad de la producción forestal. Sin embargo, la fertilización en plantaciones comerciales en Misiones no es habitual. Existen numerosos antecedentes de la buena respuesta de *P. taeda* a la fertilización con N y con P en su zona de origen (Albaugh et al., 1998; Albaugh et al., 2008; Albaugh et al., 2004; Fox et al., 2006; Fox et al., 2007; Nilsson & Allen, 2003). En cambio, en plantaciones sobre suelos rojos de Corrientes, Misiones y sur de Brasil se ha observado diferente respuesta dependiendo del nutriente y la dosis aplicados. En general, el crecimiento es mayor con la aplicación de P, mientras que la aplicación de N en forma de urea reduce el crecimiento de materiales comerciales de *P. taeda* con respecto a plantas sin fertilizar (Costa Muniz et al., 1975; Fernández et al., 2000; Fernández et al., 1999; Ibañez et al., 2004; Vogel et al., 2005). La fertilización al inicio de plantación es elegida en diversos sistemas para estimular el crecimiento inicial de las plantas con el objetivo de amortiguar el efecto

del estrés posterior al trasplante y superar rápidamente la competencia de las malezas. El efecto negativo de la fertilización con urea al inicio de la plantación en el crecimiento de las plantas dificulta la adopción de esta práctica particular como estrategia para la reposición del N extraído del sistema en los sucesivos ciclos de plantación y cosecha.

La heterogeneidad espacial de los sitios de la región caracterizada por pendientes moderadas, sumada a la heterogeneidad fenotípica observada en los materiales comerciales disponibles en el mercado, dan como resultado diferentes respuestas a la fertilización con N y P entre individuos y según la ubicación topográfica del lote fertilizado, aunque las tendencias antes mencionadas se mantienen (Faustino et al., 2011). Sin embargo, como existe variabilidad genotípica para esta especie en cuanto a mecanismos de captura y compartimentalización del carbono en respuesta a la fertilización (Tyree et al., 2009a; Tyree et al., 2009b), es posible encontrar genotipos que no sigan las tendencias generales en respuesta a la fertilización con N y P. Las respuestas reportadas derivan de experimentos realizados con plantas que no derivan de un plan de mejoramiento genético en esta región. En el contexto de la reposición de N mediante la fertilización, es importante que la fertilización con urea no resulte perjudicial al crecimiento.

El plan de mejoramiento genético de INTA para la especie *P. taeda* comenzó en la década de 1990. El objetivo principal de dicho programa es el abastecimiento de semillas de calidad genética superior. El mismo fue estructurado con distintas poblaciones o grupos de individuos que se fueron conformando del trabajo en conjunto entre INTA y empresas forestales, principalmente de Misiones y Corrientes. Como población base se utilizaron plantaciones comerciales de diversos orígenes, procedencias y edades dentro de la región Mesopotámica. De esta manera se logró una población de selección compuesta por 130 selectos iniciales de orígenes conocidos. Por otro lado, se cuenta con una población de mejora donde son evaluadas las progenies de las selecciones antes mencionadas. Los materiales que conforman la población de mejora responden a criterios de selección basados principalmente en mayor crecimiento en volumen y forma, con especial énfasis en rectitud de fuste. A partir de la población de selección se han originado las poblaciones de producción, cubriéndose en San Antonio, Misiones, más de 12 ha de huertos semilleros clonales (HSC) con diferentes constituciones (Rodríguez & Gauchat, 2005). De estos HSC proceden las semillas de las cuatro familias elegidas para ser evaluadas en el presente trabajo. La selección de las familias fue en base a un ranking en función del crecimiento en volumen y la rectitud del fuste evaluados en la progenie de cada una de las familias que componen los HSC, al quinto año de edad.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta en crecimiento a la fertilización con N y P de cuatro familias de *P. taeda*, y determinar si existe variabilidad genética en la respuesta a la suplementación con nutrientes. Si existen familias que responden positivamente a la fertilización con urea o que al menos no son afectadas negativamente, pueden ser

incorporadas en etapas posteriores de los planes de mejoramiento, porque poseen características que permiten el uso de la fertilización en el establecimiento como estrategia para mantener la fertilidad de los sitios.

METODOLOGÍA

El ensayo se instaló en el establecimiento experimental Campo Anexo Laharrague, perteneciente a la EEA INTA Montecarlo, ubicado en el departamento de Montecarlo, Misiones, Argentina (26° 30'S, 54° 40'W). El clima de la región es subtropical sin estación seca marcada, las precipitaciones anuales son del orden de los 2000 mm y la temperatura media anual ronda los 20° C. El suelo del sitio es arcilloso, rojo y profundo.

El ensayo tuvo una duración de 16 meses. Se utilizaron 4 familias de *P. taeda* pertenecientes al plan de mejoramiento genético de INTA EEA Montecarlo, selectas por presentar diferentes tasas de crecimiento en volumen y rectitud de fuste, dentro de un ranking de familias, el cual se elaboró mediante la combinación de ambas variables, representando cada una de ellas en un 70% y 30% respectivamente. Las familias, todas de origen Marion, se denominan: M8, M20, T25 y T29. Las dos primeras poseen altas ganancias en crecimiento y rectitud de fuste, mientras que las dos segundas poseen bajas ganancias en crecimiento y rectitud de fuste, dentro del conjunto de familias selectas.

En septiembre de 2009 las plantas de 3 meses de edad fueron llevadas a campo. Los plantines en tubetes, se plantaron con un espaciamiento de 0,8 m entre filas y entre líneas, para minimizar la heterogeneidad especial de condiciones topográficas, edáficas y lumínicas, dado que se planeó que el ensayo tuviera corta duración. No se realizó riego de asiento ya que se consideró que el suelo estaba suficientemente húmedo. En cada parcela se plantaron 16 individuos: 4 de cada familia (4 subparcelas por parcela). Se utilizó un diseño factorial 2x2x4. Los tratamientos surgieron de la combinación de dos disponibilidades de N (sin o con urea, -N o +N respectivamente), dos disponibilidades P (sin o con superfosfato triple de calcio, -P o +P respectivamente) y las cuatro familias (M8, M20, T25, T29). Por lo tanto, cada familia fue fertilizada con N, con P, con N y P o no fertilizada. Se instalaron tres bloques completos, dando un total de 12 parcelas determinadas por los tratamientos de fertilización y 48 subparcelas determinadas por la combinación de los tratamientos de fertilización y las familias. La fertilización de los individuos se realizó inmediatamente después de la plantación. El fertilizante se colocó en dos hoyos a 10 cm del cuello de la planta, los cuales se taparon posteriormente con tierra. La distancia se consideró suficiente, dado el reducido tamaño de los plantines, la elevada humedad del suelo y la profundidad de aplicación, para permitir que el fertilizante se disolviera antes de que las raíces entren en contacto con el mismo. A posteriori, se comprobó que no hubo toxicidad de la fertilización ya que no se registró mortandad de plantas. El N se aplicó como 100g de urea (46-0-0) equivalentes a 46 g de N y el P como 200 g de super fosfato triple de calcio (SFT) (0-48-0), equivalentes a 96 g de PO₅.

A los 8 y los 16 meses de iniciado el ensayo, se midió la altura total y el diámetro a la altura del cuello (DAC) de las plantas, con metro (precisión: 0,1 m) y calibre digital (precisión: 0,1 mm) respectivamente. Al finalizar el ensayo se cortó la parte aérea de cada individuo y se separó en tallo principal, ramas y hojas para medir el peso fresco de cada compartimento. Se pesaron sub muestras de cada compartimento y cada tratamiento (familia y fertilización), que fueron secadas en estufa a 65 ± 5 °C y pesadas con una precisión de 0,1 g. Se calculó la relación peso seco/ peso fresco, y con este cociente se estimó el peso seco de cada compartimento para cada individuo.

Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) factorial ($p < 0,05$). Cuando algún factor o interacción fue significativo, las medias se compararon con el test de comparación de medias LSD ($p < 0,05$). Los resultados que se presentan en el apartado siguiente no consideran el efecto del factor bloque ya que este no resultó significativo para ninguna de las variables consideradas. Para los análisis de DAC y altura en cada momento de medición y para los de cada compartimento de materia seca y la materia seca aérea total se utilizaron los siguientes factores con sus correspondientes niveles: N (-N, +N), P (-P, +P) y familia (M8, M20, T29, T25). Para cada familia por separado se analizó el efecto del N y el P sobre cada compartimento de materia seca y la materia seca aérea total.

Se ajustaron regresiones entre la materia seca aérea total y la materia seca de hojas, ramas y tallo principal ($p < 0,05$).

RESULTADOS

Las diferentes familias puestas a prueba en el ensayo se diferenciaron en tamaño y en respuesta a la fertilización. Las familias M8 y M20 tuvieron mayor tamaño que las otras dos, fueron poco afectadas por la aplicación de N y respondieron satisfactoriamente a la aplicación de P. La materia seca aérea acumulada en los distintos tratamientos de fertilización luego de 16 meses de realizada la plantación fue diferente en cada familia (Figura 1). En el gráfico no se indican los resultados de las comparaciones de medias porque no hubo interacción entre los factores familia, N y P, pero permite visualizar la heterogeneidad de tamaños entre familias y la disparidad en las respuestas a la fertilización.

Altura y DAC

A los 8 meses, la altura de las plantas dependió significativamente de la familia y de la aplicación de P. La aplicación de N no influenció a esta variable. Sin embargo, el DAC dependió de la aplicación de ambos fertilizantes y de la familia. No hubo interacción significativa entre factores. Las plantas fertilizadas con P tuvieron mayor DAC y altura respecto a las que no recibieron este nutriente, mientras que la aplicación de N afectó negativamente el DAC. Se observó diferencias entre familias en ambas variables: en las familias M el DAC y la altura fueron mayores que en las T (Tabla 1).

Dieciséis meses después del inicio de los tratamientos, las plantas fertilizadas con P tuvieron un aumento significativo de la altura y el DAC, independientemente de la familia. El N influyó significativamente las dimensiones de las plantas dependiendo de la familia (interacción N x familia). Para las familias M, el DAC y la altura no variaron significativamente con la aplicación de N con respecto a las plantas sin fertilizar. Sin embargo, las plantas de la familia T25 fertilizadas con N tuvieron significativamente menor DAC y altura respecto a las plantas que no recibieron N. Las plantas de T29 tuvieron un comportamiento similar a las de T25, es decir, sufrieron una fuerte depresión en DAC y altura en respuesta al N, sin embargo el análisis no muestra diferencias significativas entre la altura de las plantas +N y -N, posiblemente debido a que el tamaño de éstas es muy pequeño en relación al tamaño medio general de las plantas del ensayo (Tabla 2).

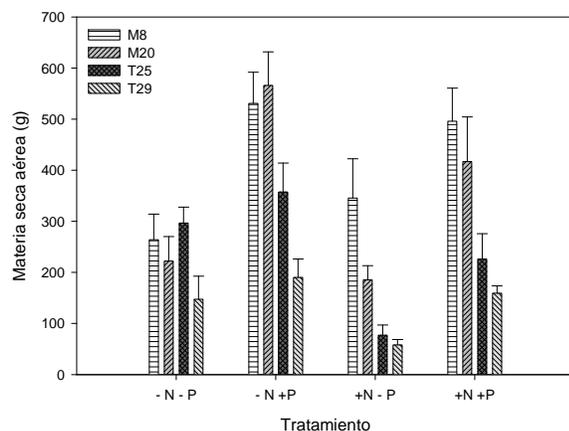


Figura 1: Materia seca aérea media (g) para cada familia en respuesta a los diferentes tratamientos de fertilización a los 16 meses de realizada la fertilización. Las plantas +N recibieron 100 g de urea, las plantas +P recibieron 200g de superfosfato triple de calcio, las plantas -N y -P no recibieron fertilización. Las líneas sobres las barras indican el error estándar de la media.

Materia seca final por compartimentos

La materia seca aérea total y la materia seca de cada compartimento fueron afectadas por el N, el P y la familia. No hubo interacción N x P para ninguna de estas variables, pero hubo interacción N x familia para materia seca de hojas y aérea total e interacción P x familia para todos los compartimentos menos las ramas. Para ninguna de estas variables hubo interacción N x P x familia (Tabla 3). Se observó relación lineal entre la materia seca total y la de los compartimentos hojas, ramas y tallo principal ($p < 0,001$) cuando se ajustaron las curvas para todas las familias y tratamientos juntos (Figura 2).

Dada la alta heterogeneidad en el tamaño de las familias, las comparaciones de medias de cada uno de estos análisis tuvieron baja sensibilidad sobre los efectos de los fertilizantes sobre cada familia en particular, especialmente en las de menor tamaño. Al indagar más profundamente sobre el efecto de cada

nutriente en cada familia, mediante el análisis de cada familia por separado, se encontró que el la aplicación de P aumentó significativamente todos los compartimentos de M8 y M20. T29 tuvo también un incremento significativo en hojas, ramas y materia seca aérea total con la aplicación de P, aunque no en tallo principal. La familia T25 no tuvo variaciones significativas en la materia seca de ninguno de sus compartimentos con la aplicación de P (Figura 3). La aplicación de N tuvo un efecto depresivo significativo en todos los compartimentos de T25 y sólo en la materia seca aérea total de T29, aunque todos los compartimentos de esta última fueron levemente reducidos. Ninguno de los compartimentos de M8 y M20 se redujo con la aplicación de urea (Figura 2).

Tabla 1: Altura y DAC a los 8 meses de iniciados los tratamientos. ANOVA factorial. Factores: N, P, Familia. Medias por factor \pm error estándar. En los casos en que el factor tiene $p > 0,05$, letras diferentes indican diferencias entre medias (Test LSD).

Factor	Nivel	8 meses	
		Altura (cm)	DAC (mm)
Nitrógeno (N)	- N	55,7 \pm 2,3	8,4 \pm 0,3 (b)
	+N	53,4 \pm 2,2	7,4 \pm 0,4 (a)
	F	1,310	6,017
	p	0,253	0,016
Fósforo (P)	- P	48,4 \pm 1,8 (a)	6,9 \pm 0,3 (a)
	+P	60,6 \pm 2,2 (b)	8,7 \pm 0,3 (b)
	F	21,058	18,274
	p	<0,001	<0,001
Familia (F)	M8	63,64 \pm 3,2 (c)	9,6 \pm 0,5 (c)
	M20	57,7 \pm 3,1 (bc)	7,9 \pm 0,5 (b)
	T25	53,1 \pm 2,8 (ab)	7,4 \pm 0,5 (ab)
	T29	45,2 \pm 2,2 (a)	6,6 \pm 0,4 (a)
F	7,017	7,964	
p	<0,001	<0,001	
N x P	F	0,006	0,012
	p	0,937	0,912
N x F	F	2,354	1,638
	p	0,076	0,185
P x F	F	0,921	0,823
	p	0,433	0,484
N x P x F	F	0,707	0,896
	p	0,550	0,446

Tabla 2: Altura y DAC a los 16 meses de iniciados los tratamientos. ANOVA factorial. Factores: N, P, Familia. Medias por factor \pm error estándar. Letras diferentes indican diferencias entre medias (Test LSD).

Factor	Nivel	16 meses	
		Altura (cm)	DAC (mm)
Nitrógeno (N)	F	4,962	9,769
	p	0,028	0,002
Fósforo (P)	- P	121,9 \pm 3,2 (a)	24,9 \pm 1,1 (a)
	+P	151,1 \pm 4,0 (b)	31,9 \pm 1,3 (b)
	F	31,464	31,072
	p	<0,001	<0,001
Familia (F)	F	21,647	28,387
	p	<0,001	<0,001
N X P	F	0,036	0,105
	p	0,850	0,746
N X F	M8 +N	167,3 \pm 9,4 (c)	37,8 \pm 1,8 (d)
	M8 -N	168,5 \pm 8,2 (c)	37,5 \pm 2,3 (cd)
	M20 +N	148,8 \pm 10,1 (bc)	29,1 \pm 2,5 (b)
	M20 -N	151,3 \pm 9,1 (bc)	32,5 \pm 2,3 (bc)
	T25 +N	106,9 \pm 9,0 (a)	20,3 \pm 2,2 (a)
	T25 -N	143,9 \pm 6,8 (b)	30,8 \pm 1,7 (b)
	T29 +N	107,5 \pm 6,7 (a)	20,5 \pm 1,5 (a)
	T29 -N	112,1 \pm 7,1 (a)	22,3 \pm 1,4 (b)
	F	3,203	4,068
	p	0,026	0,009
P x F	F	0,872	1,515
	p	0,458	0,215
N x P x F	F	0,880	1,078
	p	0,454	0,362

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este trabajo demuestran que existe variabilidad genética entre familias en respuesta a la fertilización; puede observarse aumento en el crecimiento, depresión o no modificación del

mismo. La mejora genética permite obtener genotipos con altas tasas de crecimiento que responden de manera satisfactoria a la fertilización, o al menos, que no son negativamente afectados por la adición de urea. Si bien las causas del efecto depresivo de la urea no han sido establecidas, existen algunos aspectos que merecen ser analizados. Por un lado, la respuesta negativa en crecimiento en diámetro y altura a la fertilización nitrogenada se ha observado en plantaciones de *P. taeda* con distintos sistemas de cultivo y sobre diferentes suelos de la región: plantaciones en suelo rojo profundo de Corrientes con fertilización inicial con urea aplicada en chorrillos a 15 cm del cuello de la planta (Fernández et al., 2000), fertilización en el hoyo de plantación con sulfato de amonio en suelos ácidos del sur de Brasil (Costa Muniz et al., 1975), fertilización inicial con urea en hoyos de 10 cm de profundidad a 20 cm del cuello de la planta en suelo pedregoso de Misiones (Faustino et al., 2011), fertilización con urea en orificios a 5 cm del cuello de la planta en macetas con suelo pedregoso de Misiones (Faustino, datos no publicados). Sin embargo, la fertilización con urea en orificios a 5 cm del cuello de la planta en macetas con un sustrato arenoso, tuvo un efecto positivo en el crecimiento de las plantas (Faustino, datos no publicados), al igual que lo reportado en una amplia variedad de suelos y modos de aplicación (Albaugh et al., 1998; Albaugh et al., 2006, 2008; Albaugh et al., 2004; Dalla Tea & Jokela, 1991; Fox et al., 2007; Jokela et al., 2000; Rahman et al., 2006), lo cual indica que la fertilización nitrogenada tiene efecto depresivo en algunos suelos, y no se relaciona necesariamente con las dosis aplicadas ni la forma de aplicación. Por otro lado, como no se observó interacción NxP, no existiría un desbalance entre la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo. Esta idea también es confirmada porque la concentración de N y P foliar en las familias M8 y T29 es similar y no se modificó con la fertilización (17,5 mg g⁻¹ de N y 1,3 mg g⁻¹ de P) (Faustino et al., 2012). Estos valores están por encima de los determinados como críticos (Allen, 1987; Needham et al., 1990) y corresponden a los establecidos como satisfactorios (Gregoire & Fisher, 2004; Jones, 1993) para la especie en la bibliografía. Es así que descartamos un problema de alta concentración o toxicidad debido a la dosis aplicada y a la distancia de aplicación del fertilizante. Dado el pequeño tamaño de las plantas al momento de la plantación, de haber existido problema de toxicidad, posiblemente se hubiera manifestado en la mortandad a edad temprana, problema que no existió en este ensayo. Por otro lado, el efecto depresivo de la urea es similar cuando la fertilización se realiza con otras fuentes de nitrógeno de reacción ácida, como el amonio y el nitrato (Faustino, datos no publicados). Como la urea tiene reacción alcalina, los cambios de pH en el suelo no serían determinantes de la reducción del crecimiento.

Tabla 3: ANOVA para compartimentos de materia seca 16 meses después de realizada la fertilización. Los factores analizados fueron N, P, familia.

Factor	Nivel	MS hojas	MS ramas	MS tallo	MS aérea
Nitrógeno (N)	F	8,019	8,052	7,717	8,768
	p	0,006	0,006	0,007	0,004
Fósforo (P)	F	35,426	28,392	51,873	42,661
	p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Familia (F)	F	16,806	18,615	23,023	21,089
	p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
N x P	F	0,018	0,325	0,910	0,162
	p	0,892	0,570	0,343	0,689
N x F	F	3,230	1,943	1,817	2,492
	p	0,026	0,128	0,149	0,050
P x F	F	2,697	2,596	5,263	3,751
	p	0,050	0,057	0,002	0,014
N x P x F	F	0,991	1,278	1,111	1,126
	p	0,400	0,286	0,349	0,343

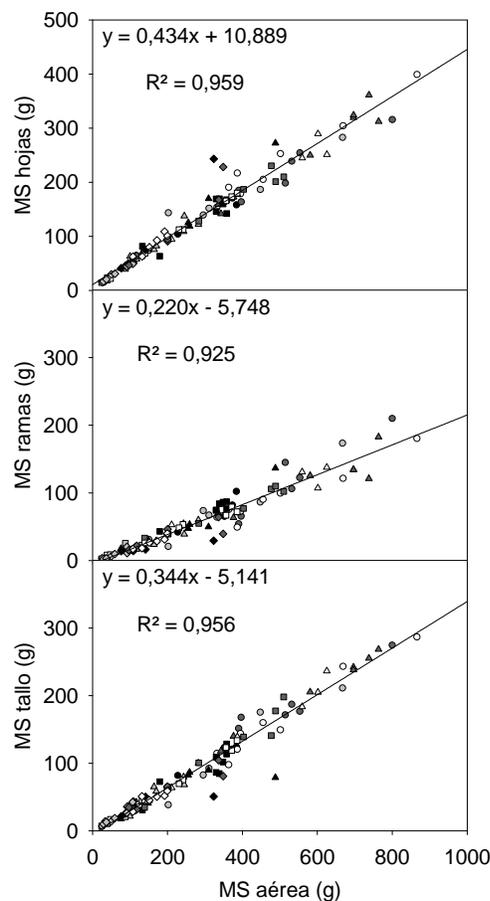


Figura 2: Regresión lineal para materia seca (MS) aérea vs. materia seca de hojas, ramas y tallo. Las curvas fueron ajustadas considerando la totalidad de los datos. En los tres casos las regresiones fueron significativas ($p < 0,05$). Referencias: círculos: M8, triángulos: M20, cuadrados: T25, rombos: T29; negro: -N-P, gris claro: +N-P, gris oscuro: -N+P, blanco: +N+P.

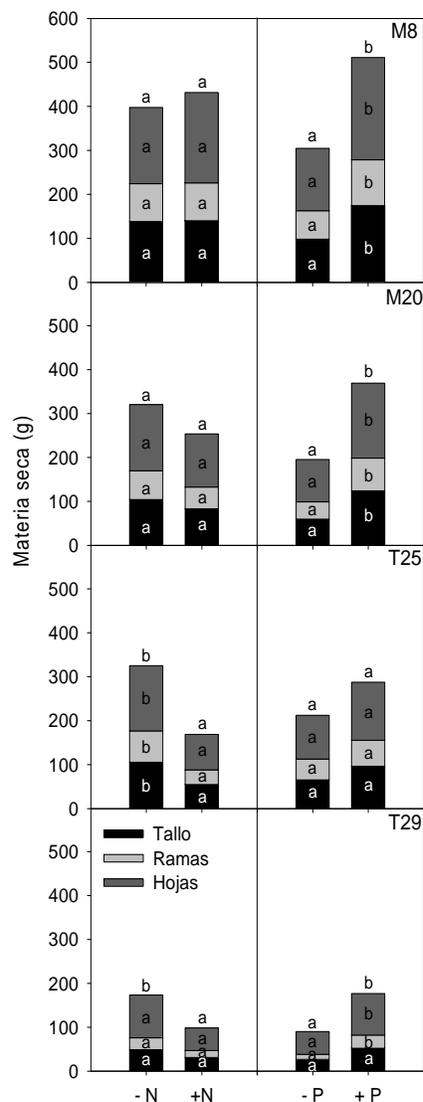


Figura 3: Materia seca por compartimento (g) para cada familia en respuesta a los factores N y P. Letras diferentes indican diferencias entre medias para cada compartimento y cada factor (Test LSD). Las letras sobre las barras indican diferencias en la materia seca aérea total.

Posiblemente, el efecto depresivo se deba a cambios morfológicos y en la partición de la materia seca de las plantas que determinan modificaciones en la capacidad de conducir agua. Estos cambios fueron diferentes para cada una de las familias evaluadas y posiblemente explican los cambios en crecimiento observados (Faustino et al., en prensa).

El DAC y la altura registrados en los dos momentos de medición en este trabajo tienen alta similitud a los obtenidos en otro estudio de fertilización realizado con plantas jóvenes provenientes de semillas no seleccionadas genéticamente, en suelos similares a los de este ensayo (Fernández et al., 2000; Fernández et al., 1999). Estos autores encuentran que el efecto negativo del N sobre el DAC y la altura de las plantas se manifiesta a partir de los seis meses posteriores a la

fertilización y se mantiene al menos hasta los 34 meses, así como el efecto positivo de la fertilización con P. En el presente ensayo, el efecto positivo del P se evidenció a los 8 meses en DAC y altura, y el efecto negativo de la urea se observó sólo en el DAC. La reducción del crecimiento en DAC suele observarse antes que la disminución del crecimiento en altura por la prioridad de destinos de fotoasimilados en los árboles. Frente a una limitación de la capacidad fotosintética, el primer destino que se reduce es el crecimiento secundario. Sólo si la disponibilidad de fotoasimilados es menor aún, se reduce el crecimiento primario (Oliver & Larson, 1996). Es importante observar que si bien a los 8 meses se observa efecto del N, del P y de la familia en el DAC, no se observa interacción entre el fertilizante aplicado y la familia. Dicha interacción, que es valiosa en el momento de evaluar las familias en el marco de un plan de mejoramiento genético, se manifiesta en la medición de los 16 meses. Por ejemplo, los efectos negativos del N en la altura de las plantas que se observa sólo en las familias T, mientras que en las otras dos no, se manifiesta a los 16 meses. En el mismo sentido, la falta de respuesta a la fertilización con P en T25 sólo se evidencia a los 16 meses. La información del tiempo mínimo para que se expresen las diferencias entre genotipos es relevante para elegir los plazos de evaluación para caracterizar familias en un plan de mejoramiento genético. Si bien se busca que los plazos sean lo más breve posible, deben ser adecuados para permitir la expresión de las diferencias genotípicas.

La medición de materia seca es mucho más laboriosa que la medición de DAC y altura, pero puede dar información sobre cambios fisiológicos debidos a la fertilización o entre familias. En este ensayo las diferencias entre tratamientos en acumulación y partición de materia seca fueron consistentes con las mediciones de DAC y altura. Si bien las familias difirieron en el crecimiento y fueron afectadas en diferente sentido y magnitud por la fertilización, no hubo cambios en las relaciones alométricas en respuesta a la fertilización en ninguna familia (Figura 2). Esto implica que ningún compartimento fue más estimulado o reducido que otro. Las pendientes positivas de rectas indican que las plantas más grandes tienen más hojas, más tallo y más ramas, pero las ordenadas al origen indican que a medida que las plantas crecen, la proporción de hojas se reduce, mientras que la de ramas y tallos aumenta. El incremento del área foliar es la consecuencia más ampliamente observada en *P. taeda* como respuesta a la fertilización (Albaugh et al., 1998; Albaugh et al., 2004; Coyle et al., 2008; Tyree et al., 2009b). Este cambio es el que motoriza el incremento de materia seca de los demás compartimentos de las plantas, ya que al aumentar el área foliar aumenta la cantidad de luz interceptada y la fijación de carbono (Gough et al., 2004; King et al., 2008). A medida que las plantas acumulan más materia seca, mayor proporción es destinada a los tallos y menos a las hojas. Estas relaciones entre órganos son similares en las cuatro familias analizadas y no son alteradas por la fertilización, esto quiere decir que el área foliar es igual de eficiente en fijar carbono en todas las familias y tratamientos.

En resumen, las plantas de las familias M8 y M20 fueron las de mayor tamaño, pero además fueron las que tuvieron mejor respuesta a la fertilización con P y N. La aplicación de P generó mayor acumulación de materia seca en todos los compartimentos evaluados, mientras que la adición de N no redujo significativamente ninguno de los compartimentos en estas dos familias (Figura 3). La fertilización inicial con P y N combinados podría ser una práctica recomendable para estas dos familias, que permitiría aumentar el crecimiento inicial y reponer estos nutrientes al sistema. Aunque las ganancias obtenidas en crecimiento serían similares con la adición de P únicamente, estas familias permiten la incorporación de N sin que las afecte negativamente.

La familia T25 fue extremadamente sensible a la aplicación de N, ya que la materia seca fue significativamente menor en las plantas fertilizadas con urea, y fue muy poco sensible a la aplicación de P, ya que este nutriente no produjo incrementos significativos de la materia seca (Figura 3). Esta familia es poco recomendable para instalar plantaciones comerciales dado que, además de tener bajo crecimiento, no responde de manera positiva a la fertilización inicial, resultado que hace que esta práctica sea poco beneficiosa desde el punto de vista económico y, por lo tanto, difícil de ser adoptada por los productores para mantener la fertilidad de los sitios. T29 fue la familia que acumuló menos materia seca en todos sus compartimentos en plantas no fertilizadas, sin embargo su respuesta a la fertilización con N no fue tan negativa como la de T25 y la adición de P produjo incrementos significativos en la materia seca aérea con respecto a las plantas que no recibieron este nutriente (Figura 3). La respuesta positiva de esta familia a la fertilización inicial con P permitiría la implementación de esta práctica en plantaciones comerciales para mantener la fertilidad y mejorar el crecimiento de las plantas. La reposición de N al sitio como fertilizante inorgánico al inicio de la plantación podría tornarse inviable desde el punto de vista económico ya que podría contrarrestar el efecto del P. Sin embargo, podría evaluarse el efecto de la fertilización en etapas más avanzadas de la rotación sobre el crecimiento de las plantas como posible alternativa para evitar el efecto negativo de la aplicación de urea, teniendo en cuenta que además sería una práctica menos costosa en términos financieros (Albaugh et al., 2003).

Cuando se fertiliza una plantación realizada con plantas provenientes de semillas no seleccionadas genéticamente, la respuesta a la fertilización con urea va a depender de la prevalencia de materiales genéticos que tengan respuesta depresiva o nula a la aplicación de este fertilizante. Consecuentemente, la respuesta será nula o negativa. En el caso de considerar las cuatro familias juntas, la urea hubiera producido una reducción del crecimiento en materia seca aérea total del 34%. Sin embargo, al analizar las familias por separado, la urea incrementó el crecimiento en materia seca aérea total el 31% en la familia M8, mientras que lo redujo 16, 60 y 74% en M20, T29 y T25, respectivamente (Figura 3). En contrapartida, la fertilización con P tiene efecto positivo en tres de las cuatro familias. Consecuentemente, es altamente probable que las plantas provenientes de semillas no

seleccionadas respondan positivamente, tal como se observó en ensayos previos (Faustino et al., 2011). Si se hubieran considerado las cuatro familias juntas, el incremento en materia seca aérea total sería del 69%. Sin embargo, al analizar las familias por separado, los incrementos fueron del 155, 100, 29 y 20 % en M20, M8, T29 y T25, respectivamente (Figura 3). Esto indica que el efecto positivo de la fertilización con P puede ser maximizado si la misma se realiza sobre material genético seleccionado.

CONCLUSIONES

La selección genética de materiales de rápido crecimiento da como resultado genotipos que presentan distintas respuestas frente a cambios en el ambiente. Las familias puestas a prueba en este ensayo, que pertenecen al grupo de familias selectas por buenos crecimientos, tuvieron diferencias en su respuesta a la fertilización con N y P, más allá de que dicha respuesta no fue un criterio de selección. Dos familias tuvieron mayor crecimiento, buena respuesta a la fertilización con P y no fueron afectadas por la adición de N. Otra familia tuvo un crecimiento intermedio, no respondió a la adición de P y fue negativamente afectada por el N. La cuarta familia, aunque fue la que alcanzó menor crecimiento sin fertilización, tuvo un buen desempeño frente a la adición de P, pero al igual que la anterior, fue negativamente afectada por la fertilización con N.

Estos resultados permiten visualizar que los planes de mejoramiento genético pueden contribuir a seleccionar familias que optimicen la fertilización inicial con P convirtiéndola en mayor crecimiento. Además, el efecto depresivo de la fertilización inicial con urea puede ser evitado mediante la selección de familias que no reduzcan su crecimiento en presencia de dicho fertilizante. Sin embargo, sería interesante evaluar la fertilización con N en etapas más avanzadas de la rotación, como práctica silvícola para recuperar o mantener la fertilidad de los sitios que están sujetos a repetidos ciclos de plantación y cosecha.

AGRADECIMIENTOS

Al equipo de mejoramiento de la EEA Montecarlo y en especial al Ing. Ector Belaber por brindarnos semillas y muy valiosa información. Este trabajo se financió con fondos de los proyectos PIP1885 (CCT CONICET La Plata) y PNFOR 2213 (INTA). Laura I. Faustino es becaria de CONICET (CCT La Plata). Nardia M.L. Bulfe es becaria de INTA (EEA Montecarlo). Martín A. Pinazo es investigador de INTA (EEA Montecarlo). Corina Graciano es investigadora de CONICET (CCT La Plata) y docente de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP).

BIBLIOGRAFÍA

Albaugh, T.J., H.L. Allen, P.M. Dougherty, L.W. Kress & J.S. King. 1998. Leaf area and above- and belowground growth responses of loblolly pine to

- nutrient and water additions. *Forest Science* 44(2):317-328.
- Albaugh, T.J., H.L. Allen & T.R. Fox.** 2006. Individual tree crown and stand development in *Pinus taeda* under different fertilization and irrigation regimes. *Forest Ecology and Management* 234(1-3):10-23.
- Albaugh, T.J., H.L. Allen & T.R. Fox.** 2008. Nutrient use and uptake in *Pinus taeda*. *Tree Physiol* 28(7):1083-1098.
- Albaugh, T.J., H.L. Allen, B.R. Zutter & H.E. Quicke.** 2003. Vegetation control and fertilization in midrotation *Pinus taeda* stands in the southeastern United States. *Ann. For. Sci.* 60(7):619-624.
- Albaugh, T.J., H. Lee Allen, P.M. Dougherty & K.H. Johnsen.** 2004. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. *Forest Ecology and Management* 192(1):3-19.
- Allen, H.L.** 1987. Forest fertilizers: Nutrient amendments, stand productivity, and environmental impact. *Journal of Forestry* 85(2):37-46.
- Barkmann, J. & C.R. Schwintzer.** 1998. Rapid N₂ Fixation in Pines? Results of a Maine Field Study. *Ecology* 79(4):1453-1457.
- Costa Muniz, P.J., G. Baldanzi & P.S. Netto.** 1975. Ensaio de adubação em *Pinus elliotti* e *Pinus taeda* no sul do Brasil. *Floresta* 6(1):5-13.
- Coyle, D.R., M.D. Coleman & D.P. Aubrey.** 2008. Above- and below-ground biomass accumulation, production, and distribution of sweetgum and loblolly pine grown with irrigation and fertilization. *Canadian Journal of Forest Research* 38(6):1335-1348.
- Cubbage, F., P. Mac Donagh, J. Sawinski Jr, R. Rubilar, P. Donoso, A. Ferreira, V. Hoeflich, V.M. Olmos, G. Ferreira, G. Balmelli, J. Siry, M.N. Báez & J. Alvarez.** 2007. Timber investment returns for selected plantations and native forests in South America and the southern United States. *New Forests* 33(3):237-255.
- Dalla Tea, F. & E. Jokela.** 1991. Needlefall returns and resorption. Rates of nutrients in young intensively managed slash and loblolly pine stands. *Forest Science* 40:650-662.
- Elizondo, M.H. & Consejo Federal de Inversiones.** 2009. Primer Inventario Forestal de la Provincia de Corrientes: Metodología, Trabajo de campo y Resultados. Informe Final. pp.
- FAO.** 2006. Global planted forests thematic study: results and analysis. *Planted Forests and Trees Working Paper* 38. De Lungo, A., J. Ball & J. Carle (eds.), Roma. pp. 168.
- Faustino, L.I., N. Bulfe, M. Pinazo, J.F. Goya, R. Martiarena, O. Knebel & C. Graciano.** 2011. Crecimiento inicial de *Pinus taeda* L. en suelo pedregoso de la provincia de Misiones, en respuesta a la fertilización con P y N. *Revista Forestal Yvyrareta* 18:52-57.
- Faustino, L.I., N.M.L. Bulfe, M.A. Pinazo & S. Monteoliva.** 2012. Dry weight partitioning and hydraulic traits in young *Pinus taeda* trees fertilized with nitrogen and phosphorus in a subtropical area. *Tree Physiol* in press.
- Fernández, R., F.R. Aspíllaga, A. Lupi, E. Lopez, R. Pezzutti, E. Crechi, N. Pahr, M. Natiuck & P. Cortez.** 2000. Respuesta del *Pinus taeda* y la *Araucaria angustifolia* a la adición de N, P y K en la implantación. en *Silvoargentina I*, Argentina, A.F. (ed.). Asociación Forestal Argentina, Virasoro P. 16.
- Fernández, R., F. Rodríguez Aspíllaga, A. Lupi, A. Hernández & H. Reis.** 1999. Efectos de diferentes prácticas de preparación del terreno y fertilización sobre el crecimiento inicial del *Pinus spp* en el NE argentino. *Bosque* 20(1):47-52.
- Fox, T.R.** 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138(1-3):187-202.
- Fox, T.R., H.L. Allen, T.J. Albaugh, R. Rubilar & C.A. Carlson.** 2006. Forest fertilization in southern pine plantations. *Better Crops* 90(3):12-15.
- Fox, T.R., H.L. Allen, T.J. Albaugh, R. Rubilar & C.A. Carlson.** 2007. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States. *Southern Journal of Applied Forestry* 31(1):5-11.
- Gauchat, M.E. & G.H. Rodríguez.** 2005. Producción de semillas de alta calidad. *IDIA XXI Forestales Año V*(8):164-167.
- Gough, C.M., J.R. Seiler & C.A. Maier.** 2004. Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology. *Plant, Cell & Environment* 27(7):876-886.
- Goya, J.F., C. Perez, J.L. Frangi & R. Fernandez.** 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13(1):139-150.
- Gregoire, N. & R.F. Fisher.** 2004. Nutritional diagnoses in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) established stands using three different approaches. *Forest Ecology and Management* 203(1-3):195-208.
- Ibañez, C., P. Nuñez, R. Pezzutti & F. Rodriguez.** 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del Noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Bosque* 25(2):69-77.
- Jokela, E.J., D.S. Wilson & J.E. Allen.** 2000. Early Growth Responses of Slash and Loblolly Pine Following Fertilization and Herbaceous Weed Control Treatments at Establishment. *Southern Journal of Applied Forestry* 24(1):23-30.
- Jones, J.J.** 1993. Modern interpretation systems for soil and plant analyses in the United States of America. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 33(8):1039-1043.
- King, N.T., J.R. Seiler, T.R. Fox & K.H. Johnsen.** 2008. Post-fertilization physiology and growth performance of loblolly pine clones. *Tree Physiology* 28(5):703-711.
- Knops, J.M.H., K.L. Bradley & D.A. Wedin.** 2002. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling. *Ecology Letters* 5(3):454-466.
- Nambiar, E.K.S.** 1997. Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science. *Soil Science Society of America Journal* 60(6):1629-1642.
- Needham, T.D., J.A. Burger & R.G. Oderwald.** 1990. Relationship between diagnosis and recommendation integrated system (DRIS) optima and foliar nutrient critical levels. *Soil Science Society of America Journal* 54(3):883-886.
- Nilsson, U. & H.L. Allen.** 2003. Short- and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted

loblolly pine. *Forest Ecology and Management* 175(1):367-377.

Oliver, C.D. & B.C. Larson. 1996. *Forest stand dynamics*, updated edition. John Wiley & Sons, Inc., New York. 544 p.

Rahman, M.S., M.G. Messina & R.F. Fisher. 2006. Intensive Forest Management Affects Loblolly Pine (*Pinus taeda* L.) Growth and Survival on Poorly Drained Sites in Southern Arkansas. *Southern Journal of Applied Forestry* 30:79-85.

Rodríguez, G. & M.E. Gauchat. 2005. Subprogramas de producción de material de propagación mejorado. En: *Mejores árboles para más forestadores: el programa de producción de material de propagación mejorado y el mejoramiento genético en el Proyecto Forestal de Desarrollo*, Norberto, C.A. (ed.). Secretaría Agricultura, Ganadería Pesca y Alimentos, Buenos Aires. pp. 241.

SIFIP. 2010. *Inventario forestal provincial 2009 - 2010*. Sistema de Información Foresto-Industrial Provincial,

Ministerio del Agro y la Producción de la Provincia de Misiones pp.

Son, Y. 2001. Non-symbiotic nitrogen fixation in forest ecosystems. *Ecological Research* 16(2):183-196.

Tyree, M.C., J.R. Seiler & C.A. Maier. 2009a. Short-term impacts of nutrient manipulations on leaf gas exchange and biomass partitioning in contrasting 2-year-old *Pinus taeda* clones during seedling establishment. *Forest Ecology and Management* 257(8):1847-1858.

Tyree, M.C., J.R. Seiler, C.A. Maier & K.H. Johnsen. 2009b. *Pinus taeda* clones and soil nutrient availability: Effects of soil organic matter incorporation and fertilization on biomass partitioning and leaf physiology. *Tree Physiology* 29(9):1117-1131.

Vogel, H.L.M., M.V. Schumacher, L. Storck & R. Witschoreck. 2005. Crecimiento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a dosis de N, P e K. *Ciência Florestal* 15(2):199-207.